



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

**HLUK V INTERIÉRU VOZIDEL A METODY JEHO
SNIŽOVÁNÍ**

NOISE IN THE INTERIOR OF VEHICLES AND METHODS OF REDUCING IT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Pavel Patočka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Václav Otipka

BRNO 2021

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student: **Pavel Patočka**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Václav Otipka**
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Hluk v interiéru vozidel a metody jeho snižování

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Bakalářská práce je zaměřena na shromáždění a zpracování informací ohledně zdrojů hluků a způsobů jejich snižování v interiérech vozidel využívaných výrobcí automobilů při jeho vývoji, ale také při dodatečném odhlučnění vozidel.

Cíle bakalářské práce:

Provést rešerši v oblasti zdrojů hluků osobních vozidel se zaměřením na hluk v interiéru.
Zpracovat přehled aktuálně používaných metod a postupů užívaných při redukci hluku v interiérech osobních vozidel.
Zjištěné metody vhodně rozčlenit do kategorií.
Uvést možnosti dodatečného odhlučnění interiérů osobních vozidel.
Vlastní zhodnocení používaných metod pro snižování hluku a možného přínosu dodatečného odhlučnění interiéru osobních vozidel.

Seznam doporučené literatury:

BARTON, David C. a John D. FIELDHOUSE. Automotive chassis engineering. Cham (Switzerland): Springer International Publishing, [2018]. ISBN 978-3-319-72436-2.

PANG, Jian. Noise and Vibration Control in Automotive Bodies. Hoboken (New Jersey): John Wiley, 2019. ISBN 978-1-119-51552-4.

MORELLO, Lorenzo, Lorenzo Rosti ROSSINI, Giuseppe PIA a Andrea TONOLI. The automotive body. Dordrecht: Springer, [2011]. Mechanical engineering series (Springer). ISBN 978-94-007-0-15-9.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalářská práce se věnuje problematice hluku v interiéru vozidel a metodám jeho následného snižování. Stručně byly popsány nejvýznamnější hlukové zdroje podílející se na celkové akustice uvnitř automobilu. Z provedené analýzy lze konstatovat, že u starších vozů se mezi hlavní zdroje hluku řadí spalovací motor, výfukový a sací systém a převodové ústrojí. V novodobých automobilech lze vzhledem k neustávajícímu vývoji alternativních pohonů naopak označit za nejvýznamnější aerodynamický hluk a hluk od kontaktu pneumatik s vozovkou. Z rešerše bylo zjištěno, že eliminace těchto zdrojů je zaměřena nejen na použití izolačních a absorpčních struktur, ale i na technologicky pokročilé metody, mezi které se řadí například ANC metoda. Ve spojitosti s narůstajícím tlakem na bezemisní dopravu, jehož důsledkem je mnohdy nedostatečné tovární odhlučnění vozidla, byly taktéž shrnuty poznatky týkající se problematiky dodatečného odhlučnění vozidel.

KLÍČOVÁ SLOVA

Hluk, vibrace, zvukové vlny, ANC, absorpční materiály, izolační materiály, odhlučnění vozidla

ABSTRACT

The bachelor thesis focuses on the issues of noise in the interior of vehicles and the methods of subsequent decrease of such noise. Moreover, the thesis shortly describes the most notable sources of noise involved in the overall acoustic within the automobile. The undertaken analysis illustrates that the main source of noise in older vehicles is the combustion engine, an exhaust and intake system, and a gearbox tool. Conversely in modern vehicles, as a result of the unceasing progress of alternative drives, the most notable noise in modern vehicles is the aerodynamic noise and the noise forming out of the contact between tires and roadway. The research showcases that the elimination of these sources is aimed at the use of isolation and absorption structures, as well as the technologically advanced methods such as the ANC method. In relation to the increasing pressure on emission-free traffic, often resulting in insufficient vehicle soundproofing, the thesis summarises the findings concerning the issues of additional vehicle soundproofing.

KEYWORDS

Noise, vibration, sound waves, ANC, sound absorptive materials, sound insulation materials, car soundproofing

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PATOČKA, Pavel. *Hluk v interiéru vozidel a metody jeho snižování* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-21]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/131845>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí práce Václav Otipka.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Václava Otipky a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 17. května 2021

.....

Pavel Patočka

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Václavu Otipkovi za ochotu spolupracovat při tvorbě mé bakalářské práce, za jeho cenné připomínky a rady. Dále bych rád poděkoval Thomasovi Rieflerovi a celému týmu 2din, za jejich ochotu a vstřícnost poskytnout mi veškeré cenné informace o dodatečném odhlučnění vozu. Rád bych také poděkoval své rodině a přítelkyni za neustálou podporu po dobu celého studia.

OBSAH

Úvod	10
1 Hluk a základní akustické veličiny.....	11
1.1 Zvuk	11
1.2 Akustické vlnění	11
1.3 Rychlost šíření akustických vln	12
1.4 Energie přenášená vlněním	13
1.5 Intenzita zvuku.....	13
1.6 Hladiny akustických veličin.....	13
2 Zdroje hluku v interiéru osobních automobilů.....	16
2.1 Hluk šířený vzduchem	16
2.2 Hluk šířený strukturou materiálu	17
2.3 Frekvenční přenosová funkce	18
2.4 Hluk spalovacího motoru.....	19
2.5 Hluk výfukového systému a sání	21
2.6 Hluk převodového ústrojí	22
2.7 Hluk vlivem kontaktu pneumatik s vozovkou	23
2.8 Aerodynamický hluk.....	24
3 Pasivní metody potlačování hluku	27
3.1 Aerodynamika karoserie	27
3.2 Změna modálních frekvencí karoserie.....	28
3.3 Zvukově izolační materiály.....	30
3.4 Zvukově absorpční materiály.....	32
3.5 Aplikace zvukově absorpčních a izolačních materiálů.....	34
4 Aktivní metody potlačování hluku.....	38
4.1 Feedforward ANC.....	39
4.2 Feedback ANC.....	39
4.3 Reálné aplikace ANC.....	40
5 Dodatečné odhlučnění vozidla	42
5.1 Odhlučnění vozu Land Rover Defender 110	42
Závěr	46
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	52

ÚVOD

Trendem dnešní doby je snaha eliminovat vysoké hodnoty vibrací a s nimi spojený hluk v mnoha oblastech každodenního života. Tímto trendem se dnes řídí i automobilový průmysl. Nároky na zajištění specifických hladin hluku uvnitř a vně automobilu však nejsou kladeny pouze ze strany zákazníka, ale především z nejnovějších nařízení (č.540/2014) Evropského parlamentu a Rady (EU). Ačkoliv je snaha hluk v dopravě obecně snižovat, v poslední době, kdy vývoj automobilů směřuje k elektrickým pohonům, dochází ke kuriózní situaci. Vzhledem k tichosti elektrických pohonů musí všechny nové automobily s hybridním a elektrickým pohonem disponovat akustickým varovným systémem AVAS, který vydává zvuk pro signalizaci přítomnosti vozidla chodcům a jiným účastníkům silničního provozu [1]. Lze tedy dokumentovat, že boj proti hluku a vibracím není bojem jako takovým, ale především bojem proti jeho nežádoucímu a zdraví škodlivému charakteru.

Ačkoliv není pochyb o tom, že nadměrný hluk a vibrace mají na člověka negativní vliv, na výše uvedeném příkladu lze reprezentovat, že existuje i mnoho případů, ve kterých lze hluk a vibrace využít ku prospěchu. Například technologie aktivního potlačování hluku ANC, kterou disponují především automobily vyšších tříd, využívá pro potlačení nežádoucího hluku v kabině přídavné reproduktory, které za pomoci vyzařování inverzních zvukových vln tento nežádoucí hluk eliminují. Další využití vibrací a hluku lze najít například u asistenčních systémů vozidel. Systémy mohou akusticky varovat řidiče ohledně vozidel v mrtvém úhlu nebo použít vibrace volantů při neúmyslném opuštění jízdního pruhu [2].

Přestože jsou metody zajišťující eliminaci hluku v dnešních automobilech poměrně pokročilé, najde se mnoho řidičů, kteří nejsou s vnitřní akustikou jejich automobilu spokojeni. Za tímto účelem na trhu vznikají nové společnosti, které se specializují na dodatečné odhlučnění vozidel. Mezi takové společnosti patří například firma 2din, ve které mi bylo umožněno zúčastnit se celkového postupu dodatečného odhlučnění vozidla a načerpat potřebné poznatky z praxe.

1 HLUK A ZÁKLADNÍ AKUSTICKÉ VELIČINY

Hluk je každý nežádoucí zvuk, který má rušivý nebo dokonce škodlivý charakter pro člověka. Rozdíl mezi hlukem a zvukem však po fyzikální stránce nelze nijak přesněji definovat [3]. Rozdíl mezi nimi spočívá pouze ve vnímání lidským sluchem. Někdo může určitý zvuk vnímat pozitivně, zatímco pro jiného člověka bude tento stejný zvuk nepříjemný a označí ho tedy jako hluk [4].

Pro hodnocení hlukového účinku se používá takzvaná hladina akustického tlaku korigovaná váhovým filtrem A (bude vysvětleno později). Hodnoty akustického tlaku pohybující se okolo 20 dB (A) považuje většina lidí za naprosté ticho. Hladina 30 dB (A) se hodnotí jako příjemné ticho. Od 65 dB (A) se již začínají projevovat negativní účinky hluku. Při trvalém pobytu v prostředí, kde hladiny akustického tlaku přesahují 85 dB (A) již může dojít k poškození sluchového aparátu. Od 130 dB (A) se obvyklé účinky hluku proměňují v bolesti sluchového orgánu a od hodnot vyšších jak 160 dB (A) může dojít k protržení ušního bubínku [4].

1.1 ZVUK

Podstatou slyšitelného zvuku je mechanické kmitání pružného prostředí. Frekvenční rozsah akustického vlnění, jenž může lidské ucho zachytit, se pohybuje v intervalu od 16 do 20 000 kmitů za sekundu [5]. Tímto, lidským uchem slyšitelným frekvenčním rozsahem akustického vlnění se zabývá technická akustika [4].

1.2 AKUSTICKÉ VLNĚNÍ

V plynných, kapalných i pevných látkách se zvuk šíří v podobě akustického vlnění, které postupuje prostředím ve vlnoplochách. V závislosti na směru kmitajících částic lze akustické vlnění rozdělit na dva druhy. Pokud jsou kmity kolmé ke směru jejich šíření, jedná se o příčné vlnění. Pokud jsou kmity se směrem jejich šíření rovnoběžné, jedná se o vlnění podélné [6]. U plynů a kapalin se zvuk šíří pouze ve formě podélného akustického vlnění, zatímco u pevných elastických materiálů se může kromě podélného vlnění vyskytovat i vlnění příčné. Důležitým faktem je, že se částice jednosměrně nepohybují se šířícím se vlněním, nýbrž pouze kmitají kolem své rovnovážné polohy. Další důležitou skutečností je, že šíření akustického vlnění je spojeno s přenosem energie [4].

Mechanické kmitání lze popsat pomocí frekvence f [Hz]. Ta je definována jako počet periodických změn (kmitů) v průběhu každé sekundy [5]. S frekvencí souvisí perioda T [s], která udává čas, za který proběhne jeden kmit. Perioda má s frekvencí následující závislost:

$$T = \frac{1}{f}. \quad (1)$$

Pro další popis veličin charakterizujících akustické vlnění lze jako příklad uvést podélnou zvukovou vlnu procházející vrstvou vzduchu (podélné akustické vlnění). Při průchodu zvukové vlny, začne tato vzduchová vrstva harmonicky kmitat okolo své rovnovážné polohy. Výchylka této vrstvy z její rovnovážné polohy je pak označována jako akustická výchylka s [6].

AKUSTICKÁ VÝCHYLKA

Akustickou výchylku vzduchové vrstvy s [m], lze vyjádřit buď pomocí funkce sinus, nebo kosinus. V tomto případě je použita funkce kosinus:

$$s(x, t) = s_m \cos(kx - \omega t). \quad (2)$$

V rovnici představuje s_m [m] amplitudu akustické výchylky a $\cos(kx - \omega t)$ je oscilující člen. Akustická výchylka je v čase t [s] závislá na úhlové rychlosti ω [rad.s⁻¹], a úhlovém vlnočtu k [m⁻¹].

AKUSTICKÝ TLAK

Při průchodu zvukové vlny vzduchovou vrstvou, dochází také k harmonickým změnám tlaku [6]. Nárůst nebo pokles tlaku v důsledku stlačení nebo roztážení vzduchové vrstvy pak popisuje takzvaný akustický tlak Δp [Pa]. Změna akustického tlaku probíhá dle následujícího vztahu:

$$\Delta p(x, t) = \Delta p_m \sin(kx - \omega t). \quad (3)$$

Veličina Δp_m [Pa] představuje amplitudu akustického tlaku, která odpovídá největšímu nárůstu či poklesu tlaku způsobeného vlnou šířící se vzduchem. Oscilující člen je označován jako $\sin(kx - \omega t)$.

1.3 RYCHLOST ŠÍŘENÍ AKUSTICKÝCH VLN

Rychlost zvukových vln závisí jak na pružných, tak na setrvačných vlastnostech hmotného prostředí [6]. Pro rychlost šíření příčných zvukových vln v pevných látkách v_p [m.s⁻¹] platí:

$$v_p = \sqrt{\frac{G}{\rho}}, \quad (4)$$

kde G [Pa] představuje modul pružnosti ve smyku a ρ [kg.m⁻³] hustotu prostředí. Analogicky lze vyjádřit rychlost šíření zvuku v kapalném a plynném prostředí v_k [m.s⁻¹], tedy podélných vln [7]:

$$v_k = \sqrt{\frac{K}{\rho}}. \quad (5)$$

Přitom K [Pa] představuje modul objemové pružnosti a ρ hustotu prostředí [7]. Pro srovnání rychlosti zvuku ve vzduchu a v pevných látkách je možné uvést jako příklad vlak pohybující se určitou rychlostí po kolejích. Jedoucí vlaková souprava svým pohybem způsobí vibrace kolejnic, které jsou následně přeneseny ve formě zvukových vln do okolního prostředí. Zvukové vlny přenášené strukturou kolejnic se v porovnání se zvukovými vlnami přenášenými vzduchem šíří několikanásobně rychleji. Pokud se člověk nachází velmi blízko kolejnic, může tedy slyšet jedoucí vlak mnohdy mnohem dříve než ho vidět. Pro orientační představu, jakou rychlostí se šíří podélné vlny v různých látkách, je uvedena tab. 1. Je však třeba brát zřetel na to, že hodnoty jsou pouze orientační, a závisí především na vlastnostech prostředí, hustotě a složení materiálu.

Tab. 1 Orientační rychlosti podélných vln v různých látkách [4] - upraveno

Prostředí	Rychlost zvuku v_k (m.s ⁻¹)
Vzduch 20°C	344
Ocel	5 750
Hliník	4 800
Sklo	5 270
Epoxydová pryskyřice	1 700

1.4 ENERGIE PŘENÁŠENÁ VLNĚNÍM

Jak již bylo uvedeno, akustické vlnění je spojeno s přenosem energie. Veličina, která slouží pro popis množství procházející akustické energie za jednotku času se nazývá akustický výkon W [W]. Vztáhne-li se tento výkon na určitou plochu, kterou je přenášen, je třeba zavést novou veličinu, nazývanou měrný akustický výkon N [W.m⁻²]. Nevýhodou měrného akustického výkonu je však jeho neustálený průběh [4]. Proto byla v technické akustice zavedena intenzita zvuku I .

1.5 INTENZITA ZVUKU

Intenzita zvuku I [W.m⁻²] je dána jako střední hodnota měrného akustického výkonu, která projde za jednotku času skrze plochu kolmou ke směru šíření [6]. Platí tedy:

$$I = \frac{N}{S}, \quad (6)$$

kde N vyjadřuje střední hodnotu akustického výkonu zvukové vlny a S [m²] je plocha kolmá ke směru šíření zvukové vlny. Akustický tlak spolu s intenzitou zvuku a akustickým výkonem popisují míru účinku akustického vlnění [6,8]. V běžné praxi se při práci s akustickými veličinami velmi často používají takzvané hladiny těchto akustických veličin.

1.6 HLADINY AKUSTICKÝCH VELIČIN

Vzhledem k tomu, že lidské ucho je schopno reagovat na velmi vysoké rozpětí úrovní výše uvedených akustických veličin, byl by pomocí nich popis hlasitosti pro běžného uživatele nevhodný. Například akustický výkon odpovídající tichému šepotu představuje hodnotu 10⁻⁹ W, zatímco akustický výkon proudového letounu může nabývat až hodnot 10⁵ W [4]. Proto byly zavedeny takzvané hladiny akustických veličin, jejichž jednotkou je „decibel“ dB. Hlavní výhodou těchto hladin je funkce logaritmus vyskytující se v jejich zápisu, která disponuje schopností pracovat právě s takto vysokými řády [6].

1.6.1 HLADINA AKUSTICKÉHO VÝKONU

Při zavedení hladiny akustického výkonu L_w [dB] je důležité stanovit referenční (nejnižší) hodnotu akustického výkonu W , kterou je lidské ucho přibližně schopno zachytit. Referenční hladina, označována jako W_0 [W], je rovna hodnotě odpovídající 10^{-12} W. Každému zvýšení akustického výkonu o jeden řád pak odpovídá zvýšení hladiny akustického výkonu o 10 dB [4]. Výsledný vztah má následující tvar:

$$L_w = 10 \log \frac{W}{W_0}. \quad (7)$$

1.6.2 HLADINA INTENZITY ZVUKU

Co se týče zvukové intenzity, lidské ucho je schopno vnímat intenzitu zvuku I řádově v intervalu 10^{12} W.m⁻². Je tedy zřejmé, že určování hlasitosti pomocí intenzity zvuku v takto vysokých řádech by bylo opět neefektivní. I zde proto byla zavedena hladina této akustické veličiny L_i [dB], která má následující tvar:

$$L_i = 10 \log \frac{I}{I_0}, \quad (8)$$

kde I_0 [W.m⁻²] představuje nejnižší (referenční) hodnotu, kterou je schopno lidské ucho zachytit. Tato referenční hodnota je rovna 10^{-12} W.m⁻². Hladina intenzity zvuku odpovídá v decibelové stupnici hodnotě 0 dB, pokud je hodnota sledované akustické intenzity I stejná jako referenční hodnota intenzity zvuku I_0 .

1.6.3 HLADINA AKUSTICKÉHO TLAKU

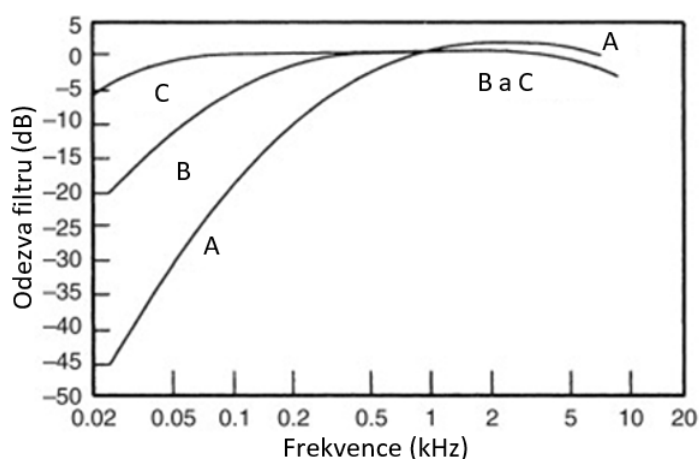
Vzhledem k opět velmi vysokému rozpětí (10^6 Pa) slyšitelného akustického tlaku p [Pa] byla podobně jako u předchozích veličin zavedena hladina akustického tlaku L_p [dB]. Tato logaritmická stupnice má jako výchozí bod referenční hodnotu akustického tlaku $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa. Pokud je sledovaný akustický tlak p roven referenční hodnotě p_0 , pak je hodnota hladiny akustického tlaku L_p v decibelové stupnici opět 0 dB [4]. Každému zdesateronásobení akustického tlaku v [Pa] pak odpovídá zvýšení hladiny akustického tlaku o 20 dB.

$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0} \quad (9)$$

Ačkoli byla definována intenzita zvuku, respektive akustický výkon včetně jejich hladin, pro popis hlasitosti vnímané člověkem se výhradně používá hladina akustického tlaku. Pro rozdíl mezi hladinou akustického výkonu a tlaku je nutné si uvědomit, že hladina akustického výkonu určuje vždy akustický výkon určitého zdroje, a tudíž popisuje pouze vlastnosti zdroje zvuku. Naopak hladina akustického tlaku určuje obecně akustický děj v místě posluchače, a proto se výrazně mění v závislosti na okolním prostředí nebo s narůstající vzdáleností od zvukového zdroje [4].

Rozdíl mezi hladinou akustického tlaku a hladinou intenzity zvuku spočívá ve směrovém působení. Zatímco akustický tlak je skalární veličina a popisuje pouze stav prostředí nezávisle na směru šíření zvuku, intenzita zvuku je jako vektorová veličina úzce spjata i se směrem jeho šíření [8]. Vzhledem k tomu, že je lidské ucho schopno přijímat zvukové vlny ze všech směrů, souvisí vnímání zvuku více s tlakem než s intenzitou.

Míra hlasitosti určována hladinou akustického tlaku však zcela neodpovídá vnímání relativní hlasitosti, jelikož v ní není zohledněna citlivost lidského ucha na zvukové vlny o různých frekvencích. Hladinu akustického tlaku je proto možné korigovat různými váhovými filtry. V této bakalářské práci a obecně pro běžné měření hlasitosti je nejčastěji používán váhový filtr A. Výsledná hodnota akustického tlaku je pak označována jako L_{pA} [dB]. V běžné praxi je možné setkat se i s váhovými filtry A, B, C [9,10]. Křivky popisující průběh korekce těchto filtrů v závislosti na frekvenci jsou uvedeny v následujícím obrázku:



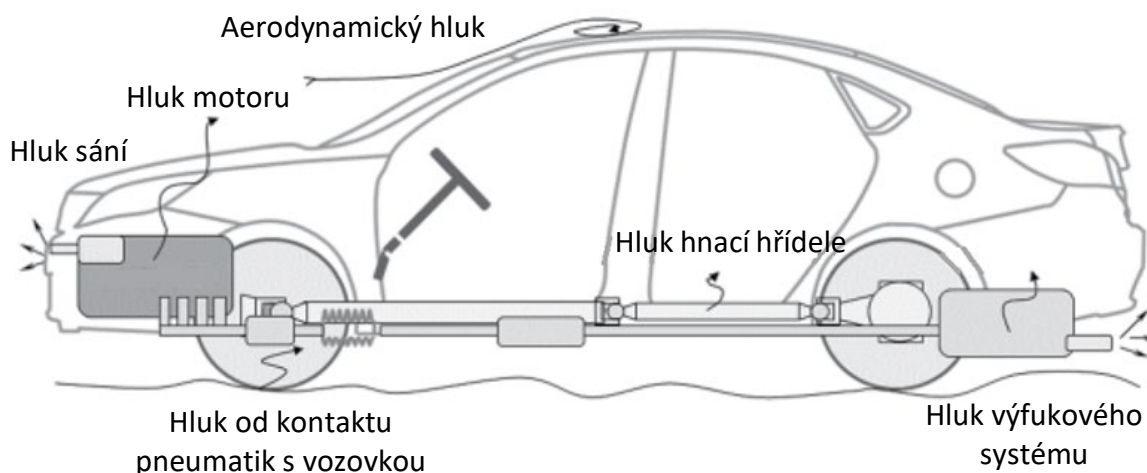
Obr. 1 Odezva různých váhových filtrů v závislosti na frekvenci [9] - upraveno

2 ZDROJE HLUKU V INTERIÉRU OSOBNÍCH AUTOMOBILŮ

V automobilu se nachází nespočet zvukových zdrojů, které mají podíl jak na vnějším hluku, tak na hluku uvnitř vozidla. Tyto zvukové zdroje se obecně rozdělují do dvou skupin. První skupinu tvoří zdroje, které emitují zvukové vlny přímo do okolního prostředí (může jít například o různé audio zařízení či hlasové projevy lidí a zvířat). Takto přenášený hluk se označuje jako hluk šířený vzduchem (Airborne sound). Druhou skupinu tvoří zvukové zdroje, které v důsledku jejich chvění (například úder kladiva do stěny) budí mechanické impulzy, které se dále šíří strukturou prvku (stěnou), dokud nejsou ve formě zvukových vln vyzářeny do prostoru. Ačkoliv jsou mechanické impulzy v konečném důsledku vyzářeny do prostoru (vzduchu) ve formě zvukových vln, je tento hluk označován jako hluk šířící se strukturou materiálu (Structure-borne sound) [11].

2.1 HLUK ŠÍŘENÝ VZDUCEM

První z možností, jakou se tedy může hluk v automobilu šířit, je jeho přenos vzduchem. Pro definici hluku přenášeného vzduchem lze uvést spalovací motor, který vlivem spalovacích cyklů emituje zvukové vlny. Tyto vlny mohou proniknout do interiéru dvěma způsoby. Při prvním způsobu jsou vlny do interiéru přeneseny přímo skrze různé otvory (díry) a obecně místy, ve kterých není zajištěna kvalitní izolace a těsnění. Při druhém způsobu vlny nejprve narazí na různé překážky (krytování motoru, přední příčná stěna), v nichž vybudí vibrace. Vlivem vybuzených vibrací jsou za překážkou emitovány sekundární (přenesené) zvukové vlny, které se tímto způsobem dále šíří, dokud neproniknou do interiéru vozu, kde jsou zachyceny posádkou vozu [12,13]. Eliminace hluku šířeného vzduchem je především zaměřena na zajištění správné izolace, aplikaci různých absorpčních materiálů a návrh takových aerodynamických tvarů, které zajistí co nejvíce plynulé proudění, respektive obtékání vzduchu kolem karoserie. Následující obrázek zobrazuje nejčastější zvukové zdroje podílející se na hluku přenášeném vzduchem.



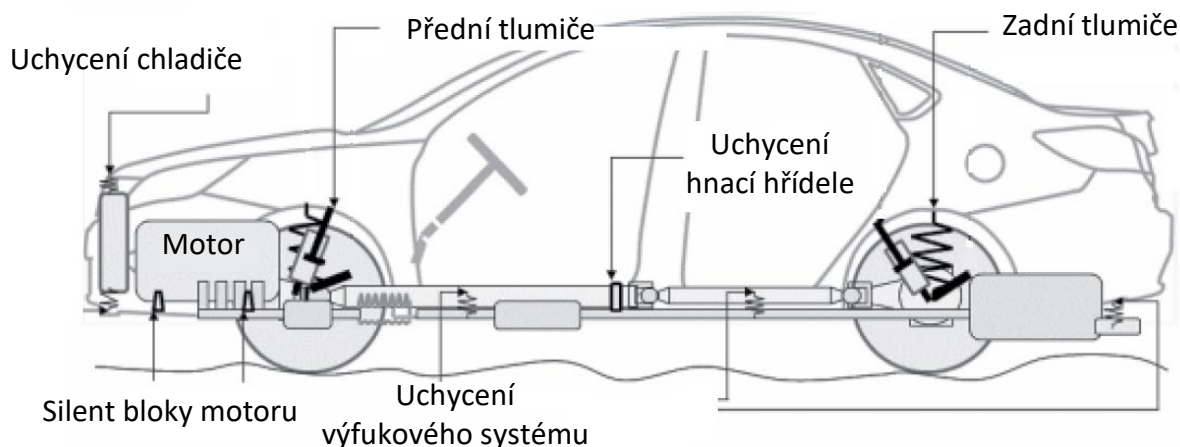
Obr. 2 Nejčastější zdroje, způsobující zvuk přenášený vzduchem [14] - upraveno

2.2 HLUK ŠÍŘENÝ STRUKTUROU MATERIÁLU

Další možností, jakou můžou zvukové vlny do interiéru vozidla proniknout, je jejich přenos strukturou materiálu. U hluku šířeného strukturou materiálu budou mít hlavní roli vibrace. Vibrace jsou definovány jako periodický pohyb tělesa, které jako celek kmitá kolem své rovnovážné polohy.

Pokud je těleso ve své rovnovážné poloze (nekmitá), je zřejmé, že nedochází k působení žádných dynamických sil. Jakmile však na těleso začnou budící síly působit (například pokud je zařízení uvedeno do provozu), začne těleso kmitat a dojde k buzení vibrací [15]. Vlivem kmitajícího, respektive vibrujícího tělesa následně dochází k emitaci zvukových vln do okolního prostředí [8].

Zvuk šířený strukturou materiálu se tedy od zvuku šířeného vzduchem liší především ve způsobu, jakým se dostane k posádce vozu. Jako příklad je znovu uveden motor automobilu. Vibrace vznikající spalovacími cykly, či například pohybem mechanických částí motoru, se nejprve přenesou na skříň (blok) motoru, odkud jsou přeneseny na silentbloky motoru, které mají za úkol tyto vibrace do nejvyšší možné míry utlumit. Zbylé neutlumené vibrace následně putují do jednotlivých částí karoserie, odkud jsou teprve ve formě zvukových vln vyzářeny do interiéru vozidla [13,16]. Eliminace hluku šířeného strukturou materiálu je především zaměřena na vhodné použití pružných izolačních prvků mezi zdroji buzení a karoserií. Dále se pak využívá různých metod cílených na změny tuhosti a optimalizaci struktury karoserie. Změnou tuhosti karoserie lze ovlivnit její vlastní frekvence a zabránit tak vzniku rezonancí, které mají na zvýšení hluku významný podíl [17]. Následující obrázek uvádí příklady zdrojů přenášejících vibrace skrze různé spojovací součásti jednotlivých částí karoserie vozidla [14].



Obr. 3 Nejčastější zdroje způsobující zvuk šířený strukturou materiálu [14] – upraveno

Je zřejmé, že do výsledného přenosu šíření zvuku je zahrnuto jak šíření vzduchem, tak strukturou materiálu [11]. Zatímco hluk šířený strukturou materiálu je dominantní při nižších frekvencích, hluk šířený vzduchem nabírá významnosti až od vyšších frekvencí viz. obr. 5. V praxi je však oddělení zdrojů vibrací od zdrojů emitujících přímo zvukové vlny šířené vzduchem poměrně složité. Pro tento účel slouží například metoda využívající znalosti přenosových cest pracující s takzvanou frekvenční přenosovou funkcí, která umožňuje stanovit odezvu na známé buzení ve frekvenční oblasti [18].

2.3 FREKVENČNÍ PŘENOSOVÁ FUNKCE

Přenosová funkce obecně slouží pro popis vztahu mezi nějakým vstupním a výstupním signálem. V akustickém systému interiéru vozidla udává přenosová funkce podíl mezi odezvou interiéru ve formě zvuku (výstupní signál) a známým buzením vibrací či zvukových vln (vstupní signál) [18]. V závislosti na způsobu šíření zvuku může být přenosová funkce rozdělena do dvou kategorií [14].

2.3.1 PŘENOSOVÁ FUNKCE UDÁVAJÍCÍ PODÍL MEZI ZDROJEM ZPŮSOBUJÍCÍM VIBRACE A ODEZVOU INTERIÉRU VE FORMĚ ZVUKU

Jak již název napovídá, přenosová funkce s indexem SB Structure-borne sound bude popisovat odezvu interiéru na budící síly způsobující vibrace. V této rovnici je $P(\omega)$ [Pa] akustický tlak udávající zvukovou odezvu interiéru a $F(\omega)$ [N] je síla budící vibrace podílející se na hluku šířeném strukturou materiálu [19]. Platí tedy:

$$H^{SB}(\omega) = \frac{P(\omega)}{F(\omega)}. \quad (10)$$

2.3.2 PŘENOSOVÁ FUNKCE UDÁVAJÍCÍ PODÍL MEZI ZDROJEM EMITUJÍCÍM ZVUKOVÉ VLNY ŠÍŘENÉ VZDUCEM A ODEZVOU INTERIÉRU VE FORMĚ ZVUKU

Přenosová funkce s indexem AB popisuje odezvu interiéru na vnější zdroj hluku. V této rovnici je $P(\omega)$ akustický tlak udávající zvukovou odezvu interiéru a $P_E(\omega)$ [Pa] je zdroj emitující zvukové vlny. Index AB značí Airborne sound neboli zvuk šířící se vzduchem [12]. Výsledný vztah má pak tvar:

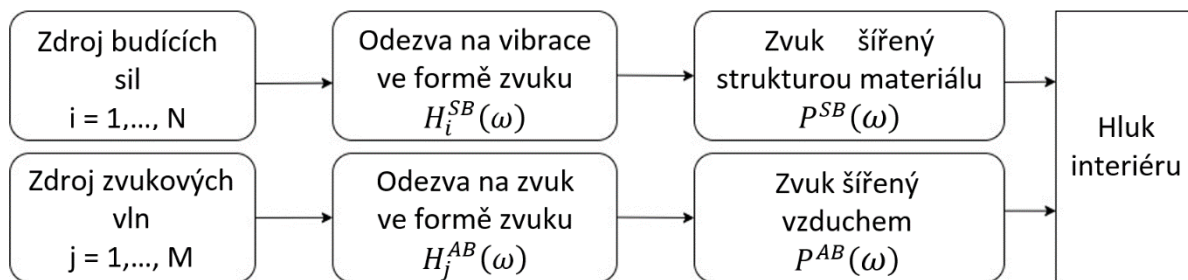
$$H^{AB}(\omega) = \frac{P(\omega)}{P_E(\omega)}. \quad (11)$$

2.3.3 CELKOVÝ HLUK V INTERIÉRU VOZIDLA

Z uvedených vztahů vyplývá, že celkový podíl jednotlivých zdrojů hluku $P(\omega)$ na výsledném hluku v kabině automobilu bude dán součtem sum jednotlivých přenosových funkcí, přičemž přenosová funkce H^{SB} je vynásobena konkrétní silou budící vibrace F_i a přenosová funkce H^{AB} zdrojem emitujícím zvukové vlny P_j . Výsledný vztah má potom tedy tvar:

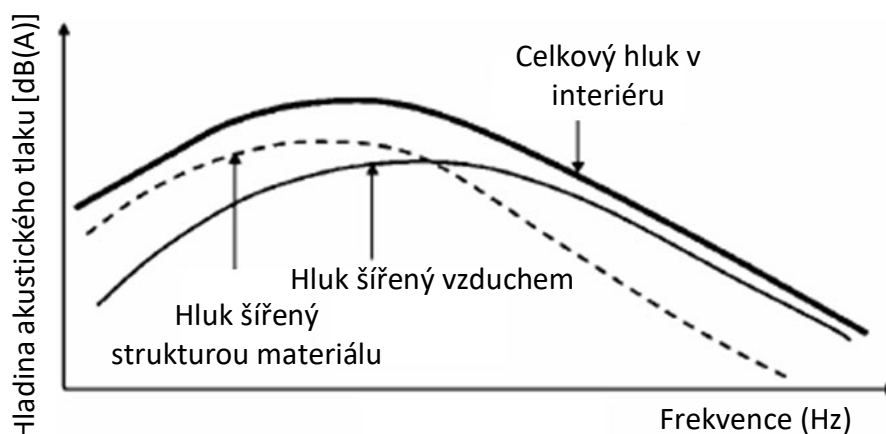
$$P(\omega) = \sum_{i=1}^N H_i^{SB}(\omega) F_i(\omega) + \sum_{j=1}^N H_j^{AB}(\omega) P_j(\omega). \quad (12)$$

Celkový příspěvek jednotlivých hluků na výsledném hluku v interiéru vozidla je pro lepší porozumění znázorněn na obr. 4.



Obr. 4 Celkový podíl jednotlivých zvuků na výsledné akustice v interiéru vozidla [14] - upraveno

Aby však bylo možné v praxi experimentálně či numericky frekvenční přenosovou funkci určit, je nutné, aby byla zajištěna linearita soustavy. Pokud je totiž soustava lineární, bude funkce nezávislá na buzení, a její určení bude poměrně přesné [18]. Jednotlivé podíly od zvuku šířeného vzduchem, respektive strukturou materiálu na celkovém hluku v interiéru vozidla uvádí následující obrázek.



Obr. 5 Frekvenční závislost jednotlivých typů hluku podílejících se na vnitřní akustice vozu [14]

V následujících podkapitolách jsou blíže specifikovány zdroje hluku, jejichž podíly na výsledném hluku uvnitř automobilu jsou považovány za majoritní.

2.4 HLUK SPALOVACÍHO MOTORU

Spalovací motor lze považovat za určitou mechanickou soustavu několika na sobě závislých systémů začleněných do bloku motoru [20]. Z hlediska vzniku lze zdroje hluku spalovacího motoru rozdělit na hluk způsobený termodynamickými cykly a hluk způsobený vlivem pohybu mechanických částí motoru [21].

2.4.1 HLUK ZPŮSOBENÝ TERMODYNAMICKÝMI CYKLY

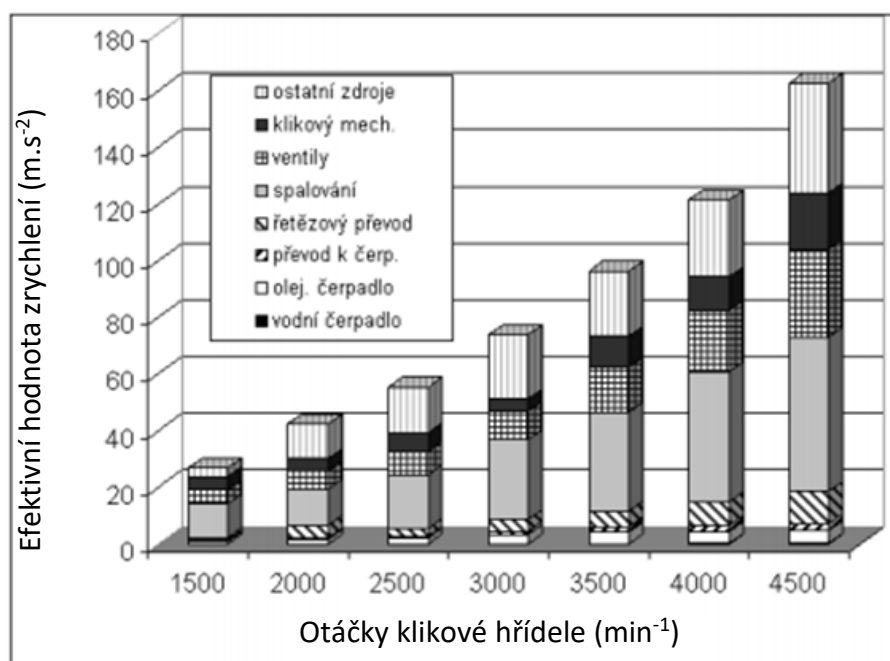
Při termodynamickém cyklu, ke kterému dochází při zážehu či vznětu směsi paliva se vzduchem, dochází ke vzniku tlakových pulzací, které následně působí na stěny válců. Stěny válců jsou tedy vystaveny silovému působení a dochází ke vzniku vibrací [19]. Vibrace jsou dále šířeny k povrchu motoru, kde jsou buď vyzářeny ve formě zvukových vln nebo jsou dále přenášeny strukturou karoserie, dokud nedojde k jejich vyzáření přímo do interiéru vozidla. Čím rychleji spalování probíhá, tím je zvukový projev významnější.

Zajímavým akustickým dějem je taktéž detonační spalování u zážehových motorů. Při tomto ději nastává situace, kdy dochází k samovznícení směsi paliva v různých částech válce ještě před tím, než dojde k jeho zážehu svíčkou. Vlivem takto vznikajících zážehů na různých místech ve válci dochází opět k tlakovým pulzacím, při nichž může nastat i chvění pístu. Takto chvějící se píst následně přijde do kontaktu se stěnou válce, což se projeví formou zvonivého hluku s vysokým tónem [22].

2.4.2 HLUK ZPŮSOBENÝ MECHANICKÝMI ČÁSTMI MOTORU

Při střídání kontaktů jakýchkoliv kovových ploch uvnitř motoru (například již zmíněným kontaktem pístu a válce) nastává opět silové působení ve formě rázů, a dochází tedy k buzení vibrací. Hluk způsobený mechanickými vřely mezi částmi motoru však v závislosti na zvyšující se provozní teplotě motoru klesá. Vlivem tepelné roztažnosti totiž dochází mezi mechanickými částmi k vymezování vůlí, a tím i ke zmenšení energie jejich rázů [20]. Na silové působení však nemá vliv pouze vymezování různých vůlí, ale i dynamika dalších pohybujících se komponentů motoru, mezi něž patří například klikový mechanismus. I při dokonalém vyvážení motoru není totiž možné budící síly spojené s funkcí klikového mechanismu dokonale potlačit. Na vině vzniku vibrací je konečná tuhost klikové hřídele, která je deformována silami od hmot klikového mechanismu.

Další významný podíl na hluku spalovacího motoru má například olejové či vodní čerpadlo, jejichž hluk je především způsoben vlivem jejich šroubového náhonu [19]. Následující obrázek shrnuje jednotlivé zdroje hluku u čtyřválcového zážehového motoru Škoda řady 8xx při jeho maximálním točivém momentu.



Obr. 6 Jednotlivé zdroje hluku pohonné jednotky [19] - upraveno

Z obrázku je patrné, že hluk i vibrace motoru výrazně rostou s jeho zatížením, respektive otáčkami klikové hřídele. Hluk a vibrace způsobené spalováním jsou dominantní při nižších otáčkách a vyšším zatížení motoru s celkovým podílem 30–40 %. S rostoucími otáčkami se projevuje hluk způsobený mechanickými komponenty motoru, na kterém mají největší podíl rázy vznikající při dosedání ventilů do sedel [19].

2.5 HLUK VÝFUKOVÉHO SYSTÉMU A SÁNÍ

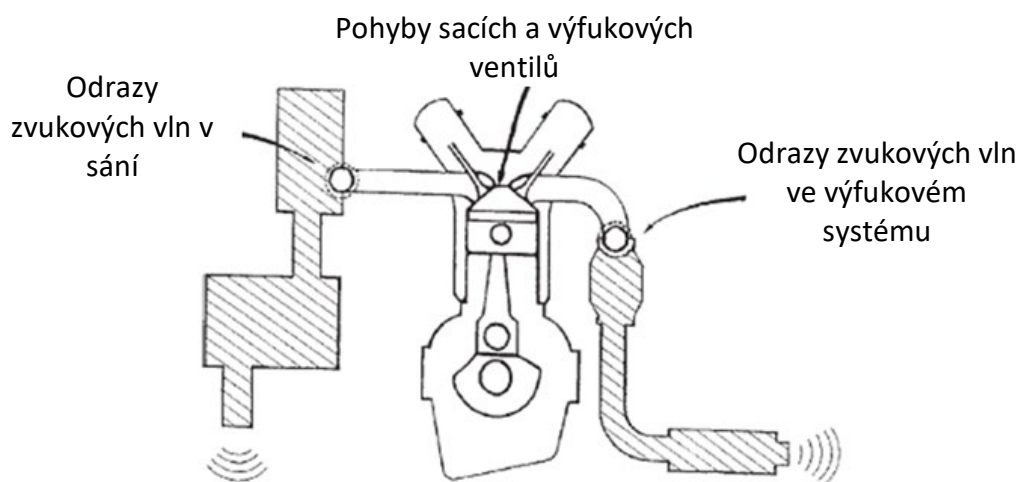
Hluk od výfukového systému a sání je úzce spjat se spalovacím motorem, jelikož je provázán s jeho periodickými pohyby sacích a výfukových ventilů [12]. Tyto periodické pohyby způsobují, že plyny v sacím a výfukovém potrubí neproudí kontinuálně, ale ve formě podtlakových a přetlakových vln [23]. Místa vzniku hluku ve výfukovém systému, respektive sání jsou popsána na obr. 7.

2.5.1 HLUK SÁNÍ

Před nasáním sacími ventily prochází vzduch sacím systémem (čistič vzduchu, sací potrubí). V okamžiku sacího cyklu dochází k pohybu pístu ve válci k dolní úvratí, což způsobí v objemu nad pístem snížení tlaku. Tento podtlak se nasávaným vzduchem šíří rychlostí zvuku do sacího potrubí ve formě podtlakové vlny. Na konci sacího potrubí dochází k odrazu této vlny, což se projeví ve formě buzení vibrací stěn sání [23]. Za účelem snížení hluku v sání se používá airbox, jenž je schopen tyto vlny uklidnit.

2.5.2 HLUK VÝFUKOVÉHO SYSTÉMU

Podobný proces nastává i po výfuku horkých spalín z válce ve formě přetlakových vln, které následně vstupují do výfukového systému (katalyzátor, výfukové svody). Tyto vlny proudící opět rychlostí zvuku, se odrážejí v místech změn průměrů výfukového potrubí, přičemž dochází opět k buzení akustických vln [23]. Pokud se jedná o přeplňovaný motor, dalším zdrojem hluku je turbodmychadlo s typickou frekvencí od 2 do 4 000 Hz [24].



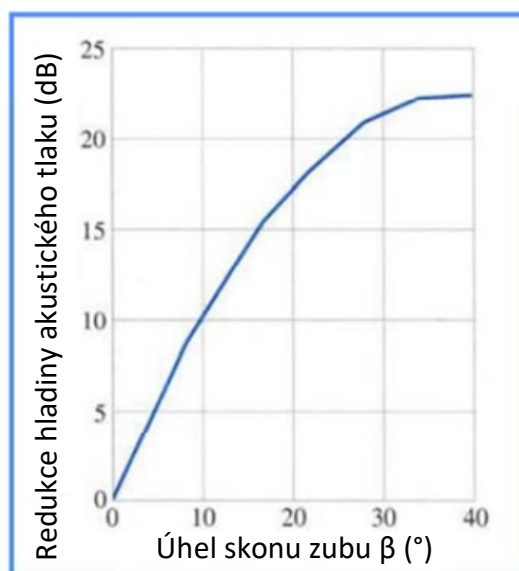
Obr. 7 Zdroje hluku od výfukového systému a sání [12] – upraveno

2.6 HLUK PŘEVODOVÉHO ÚSTROJÍ

Hlavní důvod buzení vibrací a zvukových vln v převodovém agregátu je podmíněn značnou odlišností skutečného (proměnná tuhost ozubení, rázy při vstupu zubů do záběru, tření mezi zuby) a teoretického záběru ozubení. Prvotní a nejvýznamnější zdroj hluku převodovky automobilu je tedy převážně způsoben právě záběrem boků zubů [26]. Tento hluk lze charakterizovat pomocí takzvané zubové frekvence f_z [Hz], jejíž velikost se odvíjí od počtu zubů kola z [-] a otáčkové frekvence f_n [Hz]:

$$f_z = z f_n \quad (13)$$

Hlukový projev odpovídající zubové frekvenci je často nazýván jako kvílení nebo hvízdání převodovky (whining). Z principu funkčnosti ozubených soukolí vyplývá, že při jejich skutečném záběru není možné se vzniku různých reakčních sil vyhnout, a tudíž je potlačení hluku převodových agregátů mnohdy velmi komplikované. Další významný zvukový projev je označován jako řinčení (rattle). Klepání neboli řinčení je způsobeno vzájemnými rázy mezi nezátíženými zuby s vůlí, které je vybuzeo nerovnoměrností hnacího momentu spalovacího motoru [18]. V tomto případě však malá vůle není výrobní nedostatek, nýbrž slouží pro mazání jednotlivých ozubených kol. Důvodem řinčení může být ale právě i mazací médium (olej), které má při vyšších teplotách nižší viskozitu a nedokáže tedy účinně tlumit rázy při záběru zubů [19]. Pro výrobu automobilových převodovek jsou nejčastěji používána čelní ozubená soukolí se šikmými zuby, jelikož zajišťují oproti ozubením s přímými zuby klidnější a tišší chod [25]. Hladina akustického tlaku je potom přímo úměrná obvodové rychlosti a nepřímo úměrná stupni přesnosti výroby ozubení [26]. Závislost úhlu sklonu zubu na hladině akustického tlaku je reprezentována v následujícím obrázku:



Obr. 8 Redukce hladiny akustického tlaku v závislosti na úhlu sklonu zubu [26] - upraveno

Ačkoliv je podíl hluku od převodového ústrojí dominantní při nižších rychlostech vozu, zvyšuje se i stárnutím automobilu, při němž dochází k průběžnému opotřebení jednotlivých částí převodového ústrojí. Opotřebení může vést například k degradaci jednotlivých zubů (abrazivní poškození, únavové poškození, lom), jejichž poškození se projeví ve zhoršeném záběru ozubených soukolí, a tudíž vyšším hluku [24].

2.7 HLUK VLIVEM KONTAKTU PNEUMATIK S VOZOVKOU

Celkový hluk způsobený kontaktem pneumatiky s vozovkou lze podle studie a experimentů provedených fakultou strojního inženýrství ve státě Virginia klasifikovat na hluk související s dezénem pneumatiky a na hluk s ním nesouvisející. Studie byla provedena na 27 různých površích s celkem 42 různými pneumatikami [27]. Její výsledek zobrazující jednotlivé hladiny akustických tlaků je uveden na obr. 10. Hluk nesouvisející s dezénem pneumatiky je možné ovlivnit pouze do určité míry, a to například chemickým složením či různými inovacemi pneumatiky. Jednu z takových inovací přivedla před časem na trh firma Goodyear, která se specializuje právě na výrobu pneumatik.

Jejich technologie SoundComfort osazená hned v několika modelových řadách pneumatik, je založena na vrstvě z pěnového polyuretanu viz. obr. 9, která je integrována uvnitř pneumatiky. V porovnání s konvenčními pneumatikami může použití této akustické vrstvy snížit hlučnost pneumatik až o 50 % [28].



Obr. 9 Technologie SoundComfort uvnitř pneumatiky [28]

Zbytek už se odvíjí od stavu a způsobnosti pozemní komunikace. Například francouzská firma Eurovia specializující se na dopravní stavitelství vyvinula asfaltovou směs s názvem Viaphone za účelem zvýšení protismykových vlastností a snížení hluku od pneumatik. Asfaltová směs Viaphone se pokládá v tloušťce 20–30 mm a je schopna snížit valivý hluk pneumatik až o 4 dB(A) [29]. Co se týče hluku spojeného s dezénem pneumatiky, lze jej dále rozdělit na mechanismy související s vibracemi pneumatik a mechanismy související s aerodynamickými procesy.

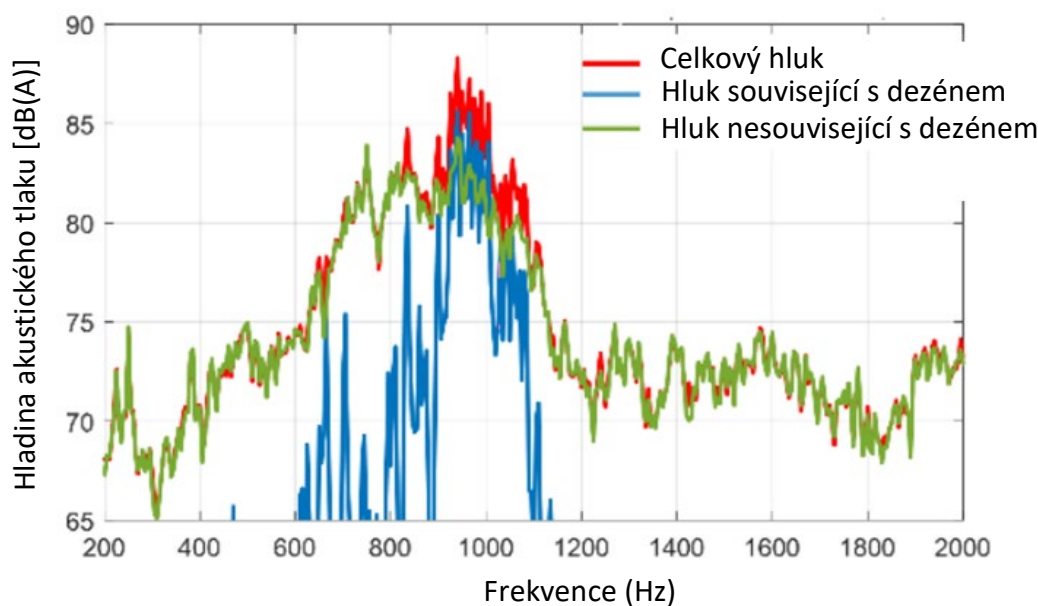
2.7.1 MECHANISMY SOUVISEJÍCÍ S VIBRACEMI PNEUMATIK

Mechanismy související s vibracemi pneumatik závisí především na interakci běhounu pneumatiky s vozovkou. Vibrace jsou buzeny v důsledku nárazů běhounu pneumatiky na nerovnosti vozovky nebo dalšími tribologickými jevy jako je například přilepení a sklouznutí (odtrhnutí) běhounu z vozovky [18].

2.7.2 MECHANISMY SOUVISEJÍCÍ S AERODYNAMICKÝMI PROCESY

Jeden z mechanismů souvisejících s aerodynamickými procesy je způsoben v důsledku vzniku vzdušných turbulencí při rotaci pneumatiky. Tyto vzdušné turbulence však vznikají převážně při vysokých rychlostech vozidla (jízda na dálnici), tudíž nenabírají v běžném městském provozu na takové významnosti.

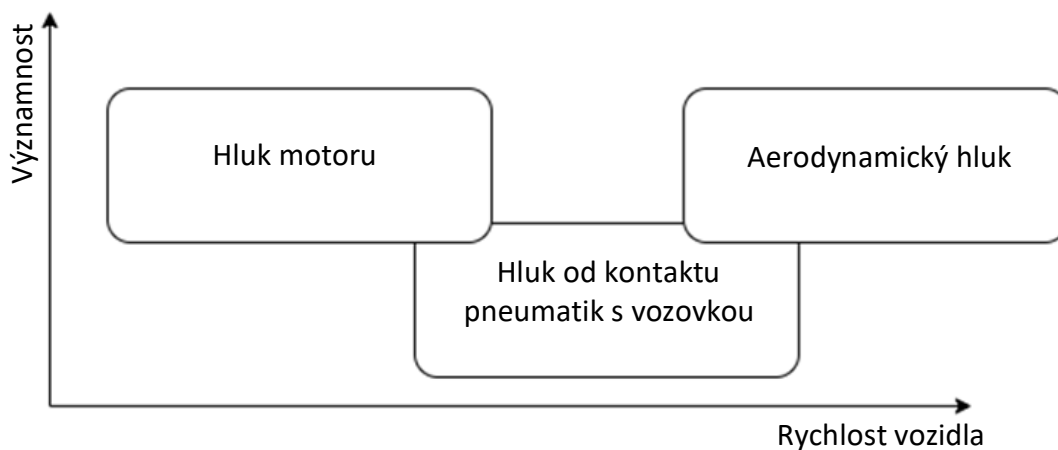
Další mechanismy spjaté s aerodynamickými procesy souvisí podobně jako u vibračních mechanismů s běhounem pneumatiky. Při otáčení pneumatiky dochází na kontaktní ploše běhounu pneumatiky ke kmitání vzduchu uvnitř kanálků, k odrazům zvuku mezi běhounem a vozovkou (horn effect) nebo k pumpování vzduchu při jeho stlačování a následném vytlačování v zadní části dutin (air pumping) [18].



Obr. 10 Podíly mechanismů na celkovém hluku od pneumatik [27] – upraveno

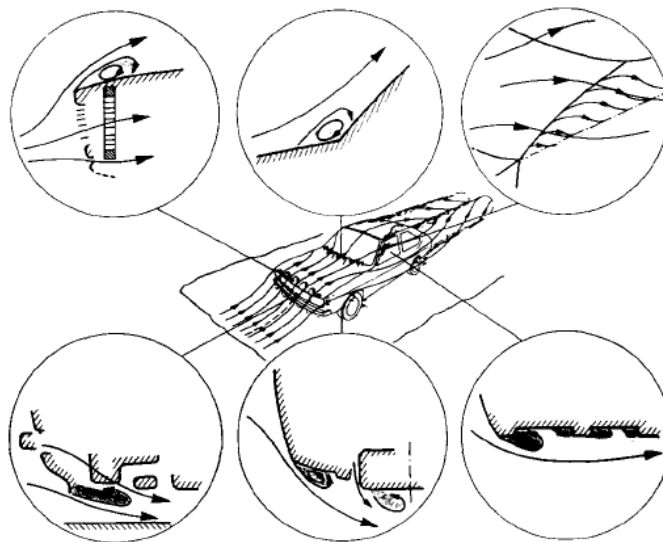
2.8 AERODYNAMICKÝ HLUK

S narůstající rychlostí vozidla začne na významnosti nabírat aerodynamický hluk (při rychlostech vyšších než 100 km/h) do takové míry, že může potlačit jak významnost hluku od kontaktu pneumatik s vozovkou, tak hluku způsobeného motorem. Následující obrázek uvádí podíl jednotlivých hlukových zdrojů při narůstající rychlosti vozidla [14].



Obr. 11 Závislost významnosti jednotlivých zdrojů hluku na rychlosti vozidla [14] - upraveno

Při pohybu vozu určitou rychlostí dochází na jeho karoserii vlivem stlačování vzduchu k vytvoření nestacionárního tlakového pole. Vozidlo musí část rozráženého vzduchu protlačit pod, nad a také skrz karoserii (chladicí a větrací systémy) [30]. Vlivem obtékání vzduchu kolem karoserie automobilu vzniká turbulentní proudění s množstvím vírových struktur [13]. Několik takových vírových struktur je zobrazeno na obr. 12. Jednotlivé zdroje podílející se na aerodynamickém hluku je možné rozdělit celkem do tří kategorií [31,32].



Obr. 12 Vírové struktury nacházející se na karoserii automobilu [13]

2.8.1 HLUK GENEROVANÝ V MÍSTECH NEDOSTATEČNÉ IZOLACE (LEAK NOISE)

Podíl na hluku generovaném v místech nedostatečné izolace je způsoben rozdílným tlakem uvnitř a vně automobilu. Tlak vzduchu na vnějším povrchu vozidla bývá na mnoha místech zpravidla nižší než tlak uvnitř kabiny. Kvůli tlakové diferenci dochází přes různé netěsnosti k úniku vzduchu z kabiny, jehož proudění budí pískavý hluk. Výsledný podíl na hluku potom závisí na velikosti této netěsnosti.

2.8.2 HLUK GENEROVANÝ V KAVITÁCH (CAVITY NOISE)

Kolem kavit nacházejících se na karoserii automobilu vzniká turbulentní proudění, které se následně podílí na emitaci zvukových vln. Nejčastějšími zdroji generující tento typ hluku jsou například spáry kolem dveří či přední mřížka chladiče. Zvláštním a velmi intenzivním zdrojem je takzvaný Buffeting noise vznikající nestabilitou ve smykové vrstvě při otevření střešního nebo bočního okna. Nestability ve smykové vrstvě následně způsobí oscilace vytvářející akustický signál, který vybudí vlastní frekvenci vnitřního prostoru automobilu. Výsledkem je velmi intenzivní a nepříjemný nízkofrekvenční hluk.

2.8.3 HLUK OD VNĚJŠÍHO PROUDĚNÍ (WIND RUSH NOISE)

Tento typ hluku je podobně jako u hluku generovaného v kavitách způsoben vznikem turbulentního proudění s množstvím vírových struktur. Vlivem tohoto proudění vzniká na karoserii automobilu nestacionární tlakové pole, ve kterém dochází k fluktuaci tlaků. Tyto fluktuace tlaků následně způsobují vibrace oken a velkých ploch karoserie a jsou vyzářeny do interiéru vozidla ve formě zvukových vln. Pro útlum tohoto typu zvuku se dnes používají dvojité skla, jejichž výrobou se zabývá například evropská firma Saint-Gobain. Tabule, ze kterých se ve firmě skla vyrábí, mají nejčastěji tloušťky 2,1 a 1,6 mm a lze je různě kombinovat. Vzhledem k dnešnímu zájmu automobilek co nejvíce snižovat emise CO₂ se však nově používají nejčastěji kombinace skel tloušťky 1,8 a 1,4 mm, mezi které se umístí speciální protihluková fólie. Sklo vybaveno takovouto akustickou fólií je schopno pohltit až o 10 dB hluku více oproti sklům bez této akustické úpravy [33].

3 PASIVNÍ METODY POTLAČOVÁNÍ HLUKU

Hluk šířící se ve formě tlakových vln je možno potlačit dvěma základními metodami. První metodou je jeho pasivní potlačení. Pasivní metody se převážně zaměřují na absorpční a izolační materiály, schopné zvukovým vlnám odolávat nebo je absorbovat. Druhou metodou, kterou je možné potlačit hluk působící na posádku vozu, je jeho aktivní potlačení. Technologie aktivního potlačení hluku (ANC) je dnes hojně využívána v mnoha elektronických zařízeních jako jsou například sluchátka či chladiče centrálních procesorových jednotek v počítači [34]. Setkat se s touto metodou je však možné i v biomolekulárním inženýrství v odvětví syntetické biologie [35]. Automobilový průmysl proto nezaostává a snaží se v nových automobilech metodu aktivního potlačení hluku implementovat.

Ačkoliv jsou pasivní metody potlačování hluku převážně zaměřeny na aplikaci zvukově absorpčních a izolačních materiálů, je pro zvukový útlum důležitý i návrh karoserie. Správný návrh konstrukce karoserie (pevná struktura, správné aerodynamické tvary) totiž zajistí nejen zvýšení bezpečnosti vozidla, ale taktéž zabráni šíření zvukových vln do interiéru vozidla. Jedním ze stěžejních faktorů, na který je při konstrukci karoserie kladen důraz, je návrh takových aerodynamických tvarů, které umožní co nejvíce plynulé obtékání vzduchu kolem vozidla.

3.1 AERODYNAMIKA KAROSERIE

Jelikož je aerodynamický hluk v novodobých vozech považován za nejvýznamnější, je na metody jeho pasivního snižování zaměřena tato samostatná podkapitola. Jak již bylo zmíněno, jedním z hlavních přístupů, kterým lze eliminovat aerodynamický hluk, je zajištění co nejvíce plynulého proudění, respektive obtékání vzduchu kolem karoserie. Mezi důležitá místa umožňující takto plynulé proudění vzduchu, a tedy zvukový útlum, se řadí například prostor mezi předním nárazníkem a kapotou. Pokud je mezera spojující nárazník a kapotu kolmá ke směru proudění vzduchu, bude generovaný aerodynamický hluk podstatně vyšší, než pokud bude tato mezera orientována pod úhlem ke směru proudění viz. obr. 13 [14].

Mezi další takové důležité místo patří prostor mezi kapotou a čelním sklem. Aby nedocházelo k narušení plynulého proudění vzduchu stěrači, bývá konec kapoty mnohdy zalomen (zaoblen) viz. obr. 13, nebo je do tohoto prostoru umístěn deflektor. U novějších vozů se však stěrače nejčastěji umísťují pod zadní hranu kapoty, a tudíž není zalomení kapoty nebo použití deflektoru nutné.

Výrazný podíl na plynulém obtékání vzduchu kolem karoserie mají taktéž A sloupky. Kromě jejich správného lícování s čelním sklem je důležité, aby měli dostatečnou šířku, respektive poloměr zaoblení [36]. Co se týče zpětných zrcátek, které je možno považovat za majoritní příčinu aerodynamického hluku, je i zde kladen důraz na zajištění zaoblených a hladkých aerodynamických tvarů. Aby však bylo obtékání vzduchu co nejefektivnější, je kromě správných geometrických tvarů nutno navrhnout konstrukci zrcátek tak, aby byla zajištěna co největší možná vzdálenost mezi zrcátkem a bočním oknem viz. obr. 13 [36].



Obr. 13 Důležité aerodynamické prvky na vozidle Hyundai i30

Pro úspěšné potlačení aerodynamického hluku je však kromě používání speciálních materiálů a geometrických úprav potřeba brát v potaz i místa, ve kterých není dostatečná a kvalitní izolace. Jedná se například o izolaci funkčních či pro výrobu potřebných děr nebo těsnění dveří [14]. Jak již bylo uvedeno v podkapitole 2.8, v místech těchto netěsností dochází vlivem rozdílných tlaků vně a uvnitř automobilu k emisi nežádoucích zvukových vln. Zabránit těmto netěsnostem je však v praxi poměrně náročné. Při pohybu automobilu totiž dochází k buzení sil, které zapříčiní vznik různých deformací a vůlí. Ačkoliv jsou deformace nepatrné, dochází k posuvům těsnících struktur a vzniku nových netěsností. Při návrhu těsnění karoserie je proto nutné s tímto faktorem počítat.

3.2 ZMĚNA MODÁLNÍCH FREKVENCÍ KAROSERIE

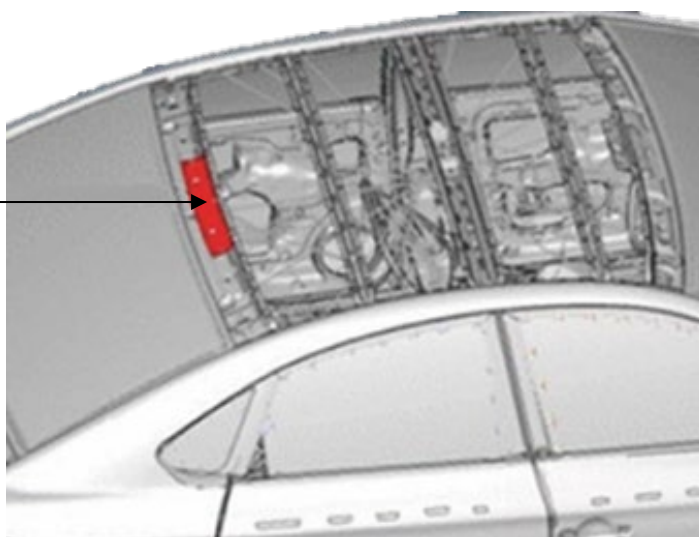
Další metoda, kterou je možné pasivně docílit zvukového útlumu, je založena na znalosti vlastních (modálních) frekvencí soustavy (karoserie). Znalost vlastních frekvencí soustavy umožní předejít shodě mezi vlastními frekvencemi karoserie a budícími frekvencemi, a tudíž nebude docházet k nadměrnému rozkmitání soustavy (vzniku rezonancí) [17]. Jelikož je vznik rezonancí spojen s nárustem hluku, je poměrně důležité těmto frekvenčním shodám zabránit. Omezit jejich vznik lze buď minimalizací frekvenčního buzení nebo změnou vlastní frekvence soustavy. Vzhledem k tomu, že dokonalá minimalizace budících sil není v praxi možná, potlačuje se vznik rezonancí především změnami vlastních frekvencí. Z rovnice pro vlastní frekvenci soustavy vyplývá, že jednou z možností, jak tuto frekvenci ovlivnit, je buď zvýšení tuhosti soustavy (karoserie) například za pomoci přidavných vzpěr či nosníků nebo změnou její hmotnosti. Na obr. 14 jsou uvedeny výztužné vzpěry umístěné v bočních dveřích automobilu Hyundai Tucson třetí generace.



Obr. 14 Přídavné vzpěry v automobilových dveřích

Kromě zvyšování tuhosti lze ovlivnit vlastní frekvenci soustavy i změnou její hmotnosti. Jednou z variant, jak změnit (navýšit) hmotnost určité části soustavy (karoserie), je přidání takzvaných hmotnostních přídavků (mass dampers). Jako příklad je uveden hmotnostní přídavek ve tvaru L profilu, který je umístěn do zadního příčnicku střechy viz. obr. 15. Přidáním tohoto profilu dojde k poklesu vlastní frekvence příčnicku střechy, čímž je opět omezen vznik rezonancí, respektive nežádoucí hluk [14].

Hmotnostní přídavek



Obr. 15 Hmotnostní přídavek v příčném nosníku střechy [14]

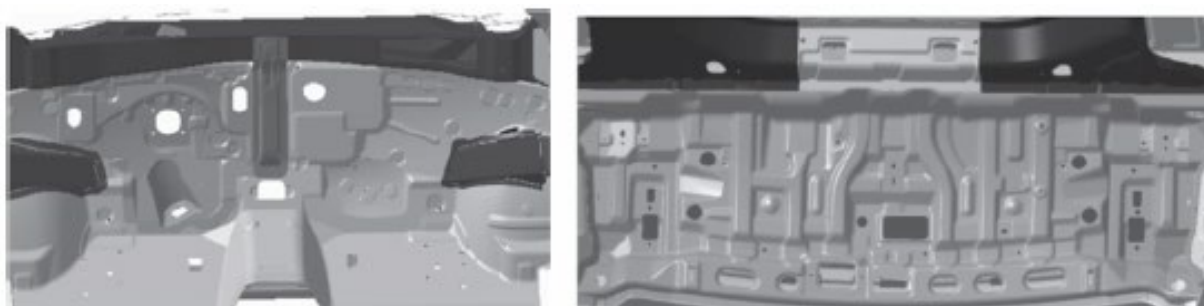
Ve špatně přístupných místech však není implementace přídavných vzpěr či hmotnostních přídavků mnohdy možná. Z tohoto důvodu se pro zvýšení tuhosti, respektive ovlivnění vlastních frekvencí karoserie používají speciální výztužné směsi. Jednou z takových směsí je například lepidlo na bázi epoxidu, které zvyšuje nejen pevnost spojů, ale po jeho tepelném vytvrzení právě výrazně zvyšuje i lokální tuhost karoserie [37]. Další technika využívající výztužné směsi pracuje s tekutými povlaky. Tyto povlaky, například ve formě akrylátové disperze na vodní bázi, se nejčastěji nanášejí nástřikem na vnější části karoserie jako jsou podběhy kol či podvozek.

Povrch tlumícího povlaku je poměrně hrubý a tvrdý, a tudíž kromě zvukové izolace zabraňuje i poškození od létajících kamínků, a chrání karoserii proti případné korozi. Následující obrázek uvádí nástřik tekutého povlaku do vnějších podběhů kol vozu Škoda Superb III.



Obr. 16 Tlumící povlak v podběžích kol

Docílit zvýšení tuhosti karoserie a ovlivnit její vlastní frekvenci je možné i různými topografickými úpravami jejího tvaru. Například v přední příčné stěně automobilu, která odděluje interiér od motorového prostoru, je pro zvýšení její tuhosti vytvořeno několik výstupků, prohlubní a žeber. Tyto tvarové úpravy (beaded shape) zlepšují nejen pevnostní a akustické vlastnosti příčné stěny, ale umožní i použití tenčích plechů pro její konstrukci [38]. Obr. 17 zobrazuje porovnání konvenční přední příčné stěny (vlevo) se stěnou obsahující několik výstupků a žebrovitých struktur (vpravo). Podobně jako u přední příčné stěny je tento typ úpravy používán i v dalších částech karoserie (přední podlaha, podlaha zavazadlového prostoru, podběhy kol).



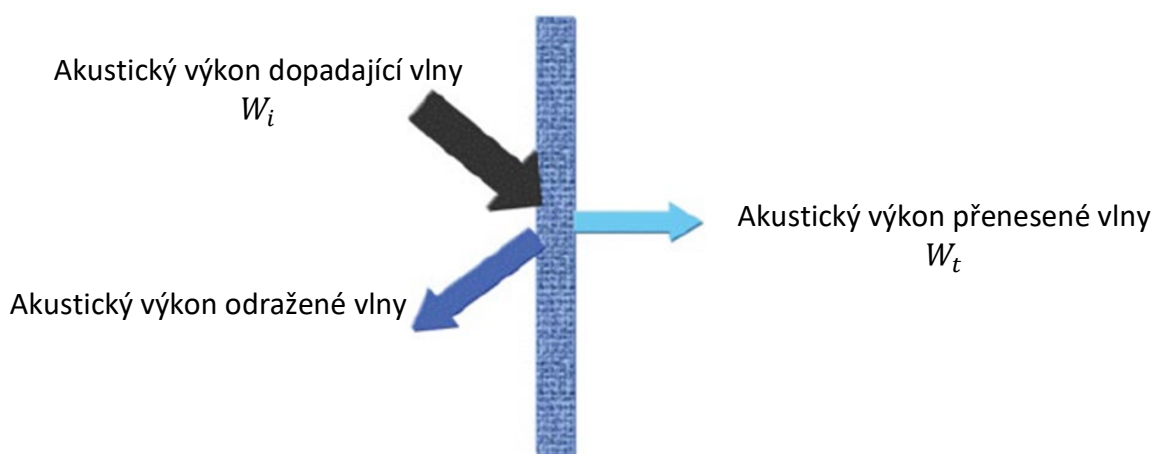
Obr. 17 Topografická úprava přední příčné stěny [14]

3.3 ZVUKOVĚ IZOLAČNÍ MATERIÁLY

Jak je již patrné z názvu, mechanismus izolačních materiálů bude založen na izolaci hluku. Pokud tedy zvukové vlny o akustickém výkonu W_i [W], narazí na určitou plochu, například kovovou desku, většina akustického výkonu těchto vln se odrazí zpátky ke svému zdroji. Tyto vlny jsou označovány jako vlny odražené.

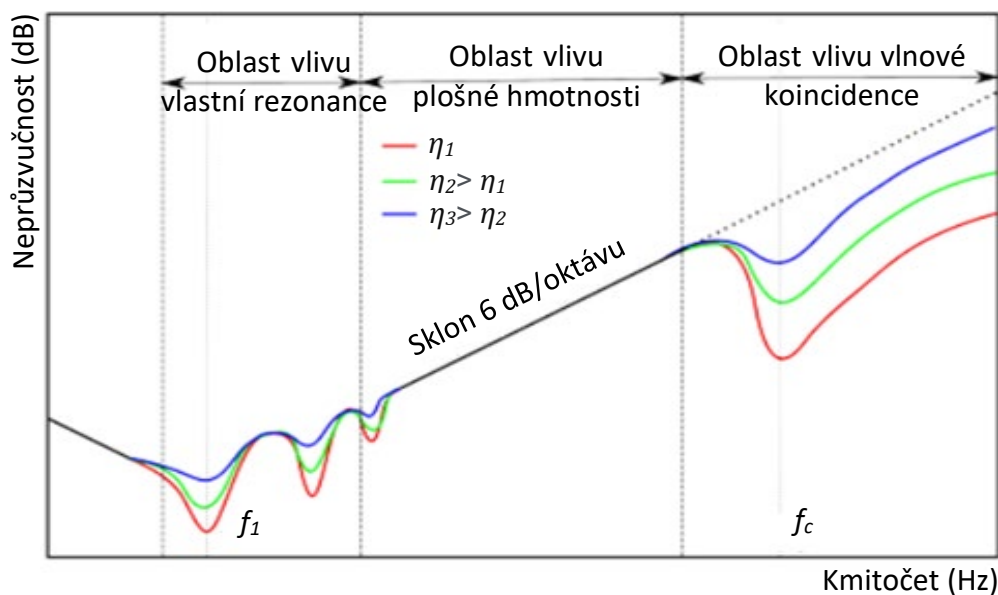
Jelikož však deska není nekonečně tuhá a široká, začne vlivem narážejících zvukových vln kmitat, čímž dojde za deskou k buzení sekundárních tlakových vln o akustickém výkonu W_t [W]. Tyto vlny jsou označovány jako přenesené vlny. Vzhledem k tomu, že přenesené vlny mají mnohem menší intenzitu než primární vlny narážející na desku, je možné desku považovat za izolační materiál [14]. Proces dopadu zvukových vln na jednu z takových desek zobrazuje obr. 18. Schopnost materiálu omezovat přenos zvuku přenášeného vzduchem z místa zdroje do místa příjmu je popsána činitelem neprůzvučnosti R [dB] [11]:

$$R = 10 \log \frac{W_i}{W_t}. \quad (14)$$



Obr. 18 Proces izolace zvukové vlny [14] - upraveno

Čím vyšší je činitel neprůzvučnosti, tím vyšší je i schopnost materiálu izolovat zvukové vlny. Výsledná neprůzvučnost desky závisí jak na strukturních vlastnostech materiálu, tak na úhlu dopadu zvukových vln. Uvažujeme-li, že je materiál (deska) homogenní a izotropní, je možné ideální průběh její neprůzvučnosti popsat v následujícím obrázku [11].



Obr. 19 Průběh neprůzvučnosti homogenní desky [11] - upraveno

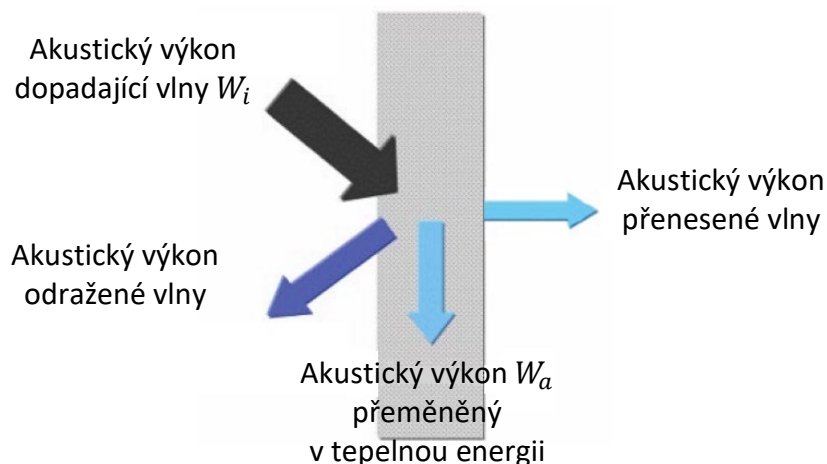
Z obr. 19 je patrné, že pro neprůzvučnost desky jsou nejdůležitější tři frekvenční oblasti. První oblastí je oblast vlivu vlastní rezonance. Pokud je frekvence nižší než vlastní frekvence desky f_l [Hz], hraje dominantní roli tuhost desky, a její neprůzvučnost se zvyšující se frekvencí klesá [16]. Jakmile frekvence dosáhne hodnot vlastní frekvence desky, dochází k prudkým poklesům její neprůzvučnosti. Hloubka těchto poklesů je dána tlumením prvku (hodnotou ztrátového součinitele η [-]). V druhé oblasti, která popisuje vliv plošné hmotnosti desky, již neprůzvučnost lineárně roste. Ze zákona hmotnosti vyplývá, že vlivem dvojnásobného zvýšení frekvence (zvýšením oktávy) či zdvojnásobením plošné hmotnosti vzroste neprůzvučnost desky o 6 dB [39,11]. Poslední oblast je závislá na takzvané kritické frekvenci f_c [Hz], která nastane při shodě rychlosti ohybové vlny ve struktuře desky s rychlostí zvukové vlny ve vzduchu [40]. Při kritické frekvenci dochází opět k výraznému poklesu neprůzvučnosti. Kritická frekvence je závislá na materiálové konstantě A [Hz-mm] (která je u oceli rovna zhruba hodnotě 12650 a u skla 12440) a tloušťce desky d [mm]. Vztah pro kritickou frekvenci má tvar:

$$f_c = \frac{A}{d}. \quad (15)$$

Z dosazení průměrných rozměrů jednotlivých materiálů používaných při výrobě automobilu, tj. například pro hojně používanou hlubokotažnou ocel 0,6 – 0,8 mm a pro kombinaci tabulí skla o rozměrech 1,6 – 1,8 mm vyplývá, že kritickou frekvenci u oceli je možné zanedbat. Velmi málo zvukových zdrojů v automobilu totiž emituje zvuk na frekvencích vyšších než 10 000 Hz. U skla, jehož kritická frekvence je vlivem rozměrů mnohem nižší, je však již nutno na tuto frekvenci brát zřetel [14].

3.4 ZVUKOVĚ ABSORPČNÍ MATERIÁLY

Při dopadu zvukové vlny na povrch absorpčního materiálu se část energie zvukové vlny odrazí a část pohltí. Pohlčená energie se pak dále rozdělí na část, která se přemění do tepelné energie uvnitř materiálu (absorpce) a na část, která je materiálem přenesena a vyzářena do vedlejšího prostoru [11]. Princip absorpčních materiálů tedy spočívá do značné míry v jejich schopnosti zvukové vlny pohltit, a nikoliv je odrazit, jako je tomu u materiálů izolačních. Účinnost absorpce těchto materiálů je podmíněna několika faktory. Mezi stěžejní faktory patří strukturální vlastnosti pórovité sítě (porézní materiály), od níž se odvíjí pružnost materiálu, respektive jeho tendence budit sekundární zvukové vlny. Záleží však taktéž na fyzikálních vlastnostech materiálu, jako je například jeho tloušťka, či na okolním prostředí, kde hraje důležitou roli například teplota, jejíž vlivem může docházet ke změně vlnové délky zvuku, či změnám v pórovité struktuře [14]. Obr. 20 popisuje proces dopadu zvukové vlny na absorpční materiál.



Obr. 20 Proces absorpce zvukové vlny [14] - upraveno

Zvuková pohltivost materiálu může být popsána takzvaným činitelem pohltivosti α [-], který závisí jak na materiálových vlastnostech, tak na úhlu dopadu zvukových vln. Pokud je akustický výkon dopadajících vln W_i roven výkonu vln odražených, koeficient pohltivosti α bude roven nule. Analogicky, pokud nastane případ, kdy bude akustický výkon dopadajících vln roven výkonu vln absorbovaných W_a , koeficient α bude roven jedné. Výsledný vztah je potom roven:

$$\alpha = \frac{W_a}{W_i}. \quad (16)$$

Jako absorpční materiály jsou většinou označovány materiály s koeficientem absorpce vyšším než 0,2 [14]. Podle konstrukčního uspořádání a principu funkce lze zvuk pohlcující materiály v automobilu rozdělit na porézní absorpční materiály a rezonanční absorpční materiály.

3.4.1 REZONANČNÍ ABSORPČNÍ MATERIÁLY

Struktura rezonančních absorpčních materiálů je nejčastěji tvořena deskou s děrovanými otvory, za kterou se nachází absorpční materiál [14]. Při nárazu začne zvuková vlna v otvorech rezonovat, čímž dochází k jejímu utlumení [8]. Absorpční materiál nacházející se za deskou následně pohltí zbylé zvukové vlny, které nebyly utlumeny v otvorech. V automobilu je na rezonanční absorpční materiál možné narazit například při izolaci motoru, pro kterou lze použít perforovanou hliníkovou fólii aplikovanou na skelné vlákno viz. obr. 21. Hliníková fólie kromě útlumu zvukových vln od motoru plní i funkci tepelného šítu [14].



Obr. 21 Perforovaná hliníková fólie aplikovaná na skelné vlákno [41]

3.4.2 PORÉZNÍ ABSORPČNÍ MATERIÁLY

Jedná se o materiály obsahující velké množství pórovitých sítí, ve kterých dochází k rozptylu akustické energie vlivem třecích a viskózních účinků vznikajících mezi póry. Porézní absorpční materiály je možné rozdělit buď podle jejich struktury, která je nejčastěji tvořena vlákny či ztuhlou pěnou (pevná polymerní část) nebo podle velikosti a uspořádání pórů (vzduchová část) [8]. Aby absorpce zvukových vln byla účinná, je nutné, aby byl materiál pružný. Proto musí být póry navzájem propojené a otevřené do volného prostoru. Pokud by byly póry uspořádány nahodile a netvořili propojenou strukturu, materiál by byl tuhý a nepohlcoval tak účinně zvukové vlny. Pěny s takto neuspořádaným typem sítě se například používají jako materiál do výplně automobilových sedadel. Obr. 22 zobrazuje strukturu polyuretanové absorpční pěny STP Biplast, která se používá k dodatečnému odhlučnění vozidla viz. str. 45.



Obr. 22 Struktura pěnového porézního absorpčního materiálu STP Biplast

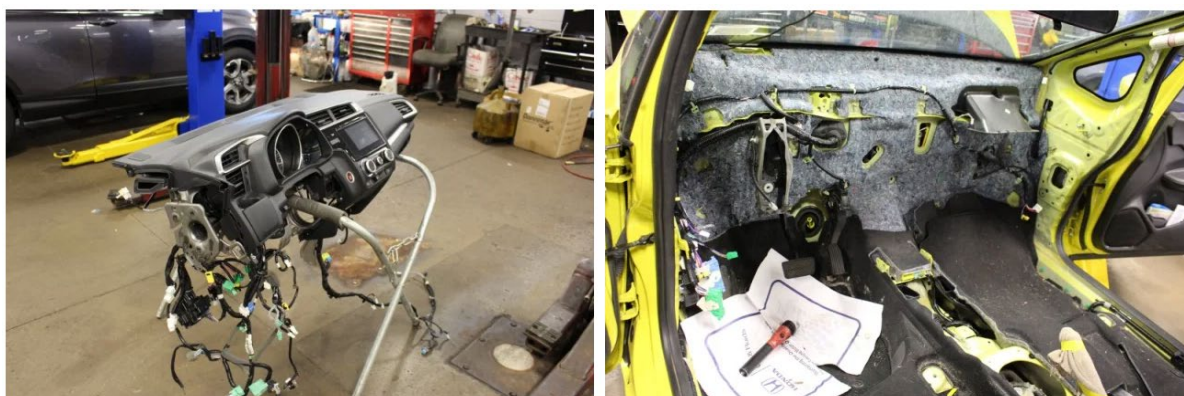
3.5 APLIKACE ZVUKOVĚ ABSORPČNÍCH A IZOLAČNÍCH MATERIÁLŮ

Pro zjednodušení karoserie automobilu uvažujme konstrukci krychle sestavenou z pevných kovových desek (izolační materiál), která umožní zjednodušeně simulovat chování zvukových vln v interiéru vozidla. Do této uzavřené konstrukce je následně umístěn zdroj emitující tlakové (zvukové) vlny. Kovové desky vyrobené kupříkladu z oceli jsou poměrně tvrdé a pevné, a pokud tlakové (zvukové) vlny narazí na tyto desky, většina z nich se odrazí zpátky k jejich zdroji. Je tedy zřejmé, že většině zvukových vln se z konstrukce nepodaří uniknout, a proto se budou odrážet od protilehlých stěn uvnitř kovové krychle. Odrážení vln následně způsobí velký nárůst akustického výkonu a amplituda těchto vln výrazně vzroste. Použití konstrukce pouze kovových desek je pro potlačení zvukových vln tedy neefektivní.

Nejefektivnějším způsobem, jakým lze uvnitř konstrukce (karoserie automobilu) pasivně potlačit zvukové vlny, je aplikovat na kovové desky absorpční materiál. Pokud je totiž absorpční materiál (pěnová vrstva) připevněn na kovovou desku, má při nárazu zvukových vln mnohem větší tendenci absorbovat zvukové vlny, jelikož se tolik neprohne, a tudíž nedojde k buzení sekundárních (přenesených) vln. Po absorpci zvukových vln pěnovou vrstvou následně odolává kovová deska mnohem menšímu náporu od zvukových vln, a proto je jejich tlumení mnohem efektivnější. Čalounění nacházející se v celém prostoru interiéru automobilu tedy neplní pouze estetickou funkci, ale má významný podíl právě na absorpci nežádoucího hluku.

3.5.1 APLIKACE ZVUKOVĚ IZOLAČNÍCH MATERIÁLŮ

Co se týče izolačních materiálů nacházejících se ve vozidle, lze jen zřídka narazit na jejich použití bez různé kombinace s absorpčními materiály. Jak již bylo uvedeno na počátku této podkapitoly, jedná se totiž o neúčinnější způsob, kterým lze pasivně potlačit nežádoucí hluk v interiéru automobilu. Kombinace těchto materiálů je použita například při konstrukci palubní desky, mezi jejíž vlastnosti patří právě i odhlučnění interiéru. Svrchní vrstva palubní desky, která plní funkci izolačního materiálu je nejčastěji tvořena polymerním materiálem (EVA) [14] nebo potahem z neperforované kůže. Pod touto vrstvou se nachází vrstva absorpčního materiálu (pěnový, vláknový), který je připevněn k přední příčné stěně automobilu, která tvoří další vrstvu izolačního materiálu, odstiňujícího hluk od motoru. Následující obrázek zobrazuje jednotlivé vrstvy, tvořící strukturu palubní desky ve vozidle Honda Fit.



Obr. 23 Demontáž palubní desky [44]

Mezi izolační materiály, které nejsou použity v kombinaci s absorpčními materiály a plní tedy svoji funkci samostatně, se řadí čelní nebo boční skla automobilu. Jelikož kritická frekvence skla výrazně ovlivňuje jeho neprůzvučnost viz. kapitola 3.3 je potřeba navrhnout rozměry jednotlivých tabulí skla tak, aby při jízdě automobilu nedocházelo k vlnovým koincencím, a tedy nárustu hluku.

Jeden z přístupů, kterým se lze vzniku vlnových koincencí vyhnout je použití vrstvené (laminované) struktury tvořené dvěma tabulemi skel, mezi které se umístí speciální PVB fólie. Další výhodou tohoto typu skla nastává v případě jeho poškození, při kterém se úlomky skla nerozsypou, ale díky fólii zůstávají pohromadě [45]. Takto vrstvené sklo je zobrazeno v následujícím obrázku.



Obr. 24 Skladba vrstveného čelního skla [45]

3.5.2 APLIKACE ZVUKOVĚ ABSORPČNÍCH MATERIÁLŮ

Vzhledem ke snaze snižovat emise a využívat co nejvíce obnovitelných zdrojů, jsou dnes odhlučňující absorpční materiály převážně vyráběny z recyklovaných materiálů [42]. Jejich složení je nejčastěji tvořeno pěnovou nebo vlákenou strukturou. U pěnového materiálu, jakým je například polyuretanová pěna (PUR), může koeficient absorpce α při frekvencích 2 000- 4 000 Hz dosahovat až hodnot 0,7. Je tedy zřejmé, že používání pěnových materiálů je velmi efektivní. Na druhou stranu polyuretanové materiály jsou poměrně drahé, a proto se převážně používají ve vozidlech střední a vyšší třídy [14]. Materiál vyrobený z polyuretanové pěny sloužící pro odhlučnění přední kapoty automobilu je uveden v následujícím obrázku.



Obr. 25 Polyuretanová pěna sloužící pro izolaci kapoty [42]

Vláknenné materiály, mezi které se řadí například skelné vlákno nebo organická či syntetická vpichovaná vláknenná plst, jsou schopny dosahovat vysokých hodnot absorpce pouze při velmi vysokých frekvencích. V porovnání s polyuretanovými materiály jsou však levnější, a jsou tedy široce používané u levnějších vozidel [14]. Koberec ze syntetické vláknenné plsti, vyroben převážně z recyklovaných PET produktů, je uveden v následujícím obrázku [42].



Obr. 26 Koberec z vpichované vláknenné plsti [42]

Jeden z nejvýznamnějších podílů na absorpci hluku v interiéru automobilu však připadá na sedadla. Vzhledem k jejich objemu a umístění ve volném prostoru jsou schopny absorbovat i zvuk o nízkých frekvencích a pohltit tak hluk od různých zdrojů. Jejich schopnost tento hluk pohltit se odvíjí především podle materiálu jejich čalounění. Pokud se jedná o kožené potahy z pravé kůže a bez jakékoliv perforace, bude absorpce poměrně neúčinná.

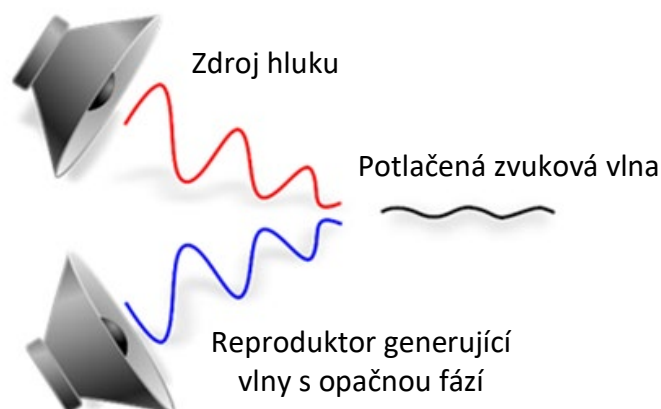
Důvodem je, že propustnost zvukových vln kůží je velmi nízká, a tudíž většina vln potahem nepronikne a odrazí se zpět. Pokud jsou však potahy látkové nebo z perforované velurové kůže, je útlum hluku mnohem účinnější, protože potah umožní zvukovým vlnám snadný průnik do nitra sedadla, kde jsou tyto vlny následně utlumeny porézním absorpčním materiálem [14]. Následující obrázek uvádí řez strukturou sedadla vozu Škoda Octavia.



Obr. 27 Řez automobilovou sedačkou [43] - upraveno

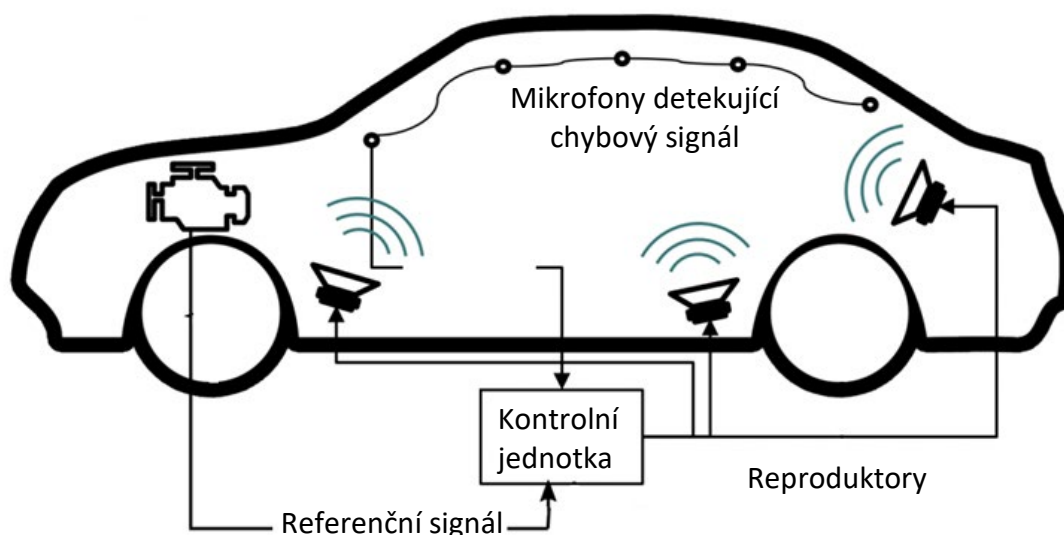
4 AKTIVNÍ METODY POTLAČOVÁNÍ HLUKU

Metoda aktivního potlačení hluku (ANC) je postup, který umožňuje aktivně reagovat na hluk od různých zdrojů a do určité míry jej potlačit. Metoda obecně spočívá v principu zachycení signálu senzorem (mikrofonem) a jeho následné filtraci, po které je signál znovu emitován zpět do prostoru reproduktorem. Cílem použité filtrace je upravit vstupní signál tak, aby se po následné emitaci zpět do akustického prostoru vyrušil se signálem původním. Jako vstupní signál je uvažována zvuková vlna šířící se v pružném prostředí, která je vyzářena určitým zdrojem hluku v automobilu. Další zvukový zdroj, kterým je reproduktor, následně vyše signál ve formě zvukové vlny se stejnou amplitudou, avšak opačnou fází [46]. To znamená, že vrcholy (údolí) první vlny se přesně vykryjí s polohami údolí (vrcholů) vlny druhé. Výchylky od obou vln se tedy vzájemně odečtou a výsledná vlna zůstane v ideálním případě přímá. Tento jev vzájemného zesilování a zeslabování vln se nazývá interference [4]. Obr. 28 zobrazuje šíření zvukových vln od zdroje hluku (červené vlny) a šíření zvukových vln s opačnou fází z reproduktoru (modré vlny) za účelem vyrušení výchylky obou vln.



Obr. 28 Zjednodušené schéma principu aktivního potlačení hluku [47] - upraveno

Výhoda aktivního potlačování hluku oproti pasivním metodám spočívá v možnosti eliminovat jak vysoké, tak nízké frekvence hluku [46]. Další výhodou aktivních metod je snížení hmotnosti vozidla, jelikož odpadá nutnost použití přídavných izolujících materiálů. Obr. 29 zobrazuje jednoduchý koncept systému aktivního potlačení hluku generováním zvukových vln z reproduktorů. Vývoj a reálná implementace této metody je však v porovnání s pasivními způsoby podstatně problematičtější. Zajistit totiž aktivní a plynulé reakce vstupních senzorů na rozmanité akustické pole (odrazy zvukových vln od protilehlých stěn) nacházející se uvnitř automobilu je poměrně náročné. Mezi další úskalí této metody se řadí fakt, že intenzita zvuku klesá s postupně narůstající vzdáleností od zdroje. Pokud se tedy přibližujeme ke zdroji hluku a zároveň oddalujeme od zdroje snažícího se tento hluk rušit, bude docházet k nepoměru mezi intenzitou hluku od původního zdroje a intenzitou hluku v protifázi, a ANC metoda nebude účinná [8]. Tento případ může nastat například při jízdě automobilu ve městě, kde se nachází nespočet vnějších a nestacionárních hlukových zdrojů, mezi něž patří například ostatní jedoucí vozy. Pokud se však jedná o stacionární a předvídatelný zvukový zdroj, jakým je například spalovací motor v autě, je ANC metoda naopak velmi efektivní. V dnešní době se v automobilovém průmyslu v závislosti na způsobu snímání zvuku a jeho následném zpracování používají metody Feedforward (dopředná) a Feedback (zpětnovazební) [48].



Obr. 29 Schéma metody aktivního potlačování hluku [49] - upraveno

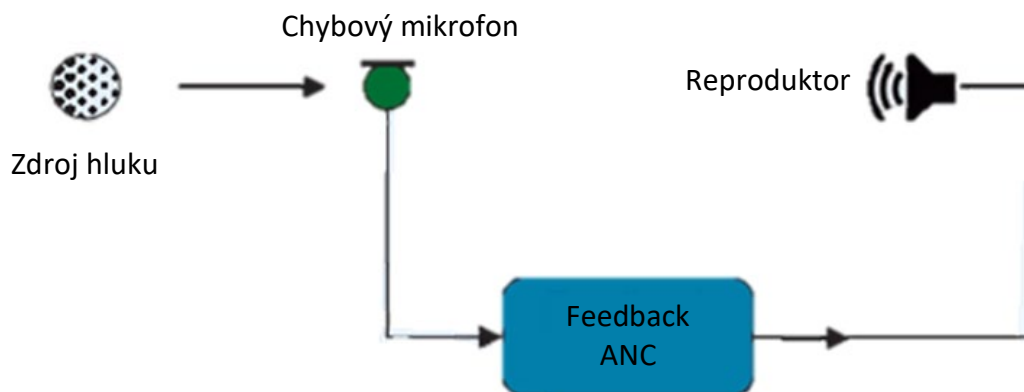
4.1 FEEDFORWARD ANC

Metoda feedforward ANC neboli metoda dopředného aktivního potlačování hluku pracuje s referenčním signálem, který generují přídavné senzory (mechanické, optické, elektronické). Jelikož je metoda závislá na koherenci mezi referenčním signálem a zvukovým zdrojem, jsou přídavné senzory umísťovány do přímé blízkosti zvukového zdroje [50]. Signál je následně zpracován pomocí ANC obvodu (ekvalizace, zpoždění, otočení fáze) a generován zpět reproduktorem ve formě zvukových vln. Zvukové vlny generované reproduktorem mající opačné výchylky se vyruší s vlnami primárními a výsledkem je poté akustické prostředí s potlačeným hlukem [51]. V interiéru vozidla však dochází k emitaci zvukových vln ve velmi širokém pásmu, a proto referenční senzor mnohdy nestíhá vstupní signály zpracovávat, kvůli čemuž může docházet k opoždění ANC obvodu. Zvukové vlny generované rušícím zdrojem budou následně taktéž opožděny (nebudou v protifázi) a jejich potlačení tudíž nebude účinné. Z tohoto důvodu se feedforward systémy dělí na širokopásmové a úzkopásmové. Další nevýhoda feedforward systému se projeví, pokud chybový mikrofon zachytí již sekundární vlny buzené rušícím zdrojem. Eliminovat tuto nevýhodu je možné použitím zpětnovazebního filtru, který bude schopen odlišit sekundární zvukové vlny generované reproduktory od primárních vln generovaných komponenty automobilu. Metoda feedforward je převážně používána pro potlačení hluku od spalovacího motoru vozidla. V tomto případě je nejčastěji tvořena referenčním senzorem měřícím otáčky motoru, chybovými senzory (mikrofony) zachycujícími primární zvukové vlny, které jsou emitované motorem a soustavou reproduktorů generujícími sekundární zvukové vlny [50].

4.2 FEEDBACK ANC

Feedback ANC neboli zpětnovazební metoda aktivního potlačení hluku je na rozdíl od metody feedforward založena na přímém zpracování signálu od chybových senzorů (mikrofonů). Tento signál (označován jako chybový) je následně kontrolní jednotkou zpracován a po úpravě vyslán zpět reproduktorem ve formě zvukových vln s opačnou fází [50].

Pomocí vysílání zvukových vln s opačnou fází, při které nastává interference, se systém snaží eliminovat hluk až do stavu, kdy hluk snímáný mikrofonom bude roven nule [52]. Schéma systému Feedback ANC je uvedeno na obr. 30. Oproti metodě feedforward, která se primárně zaměřuje na potlačení hluku přímo od určitého zdroje, se metoda feedback zaměřuje na potlačení celkového snímaného hluku v interiéru. Důvodem je, že systém nedisponuje přídatnými referenčními senzory, ale pracuje přímo s chybovým signálem. Z tohoto důvodu musí systém pracovat v celé šířce pásma a není jej možné rozdělit na úzkopásmový a širokopásmový, jako je tomu u metody feedforward.

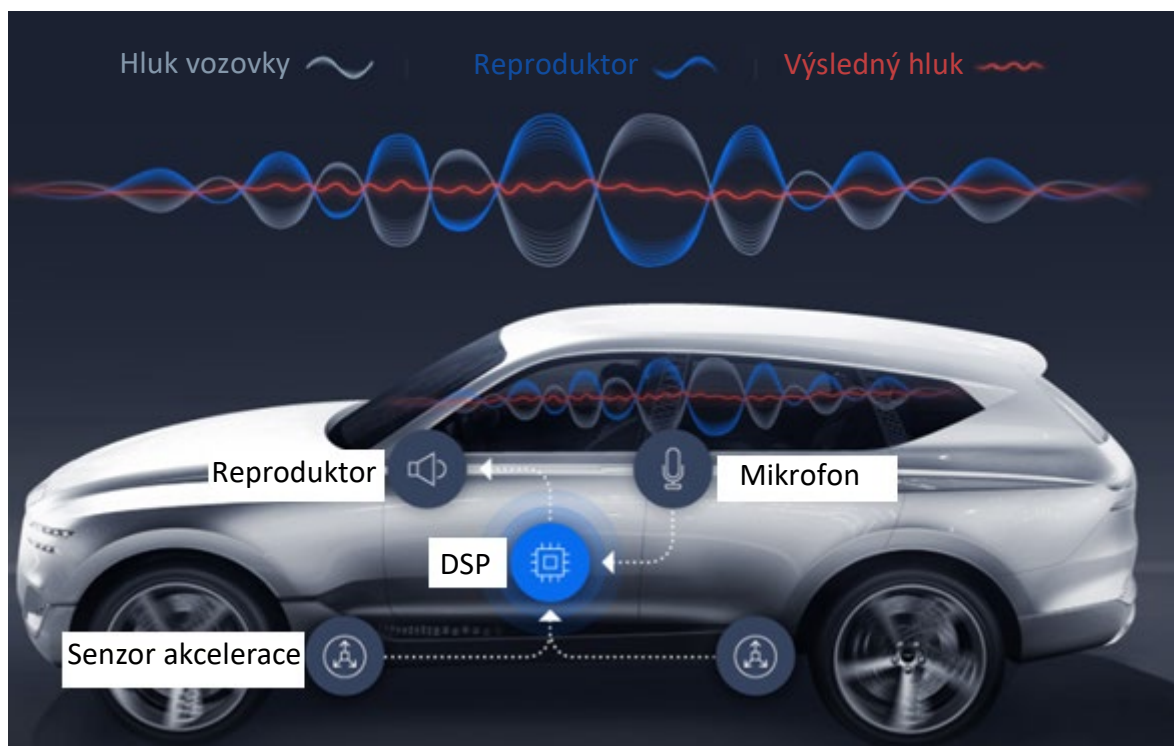


Obr. 30 Schéma zpětnovazebního systému ANC [50] - upraveno

Metoda feedback je primárně používána za účelem eliminace hluku od kontaktu pneumatik s vozovkou. Pro účinné a kvalitní potlačení hluku od vozovky je však nutno použít kombinaci metody feedback a feedforward (Hybrid ANC). Důvodem je, že metoda feedback je schopná snížit hluk pouze v přední části vozidla, a tudíž v zadní části může docházet paralelně k jeho zvýšení. Přidání systému feedforward, jenž používá jako referenční signál data z chybového mikrofonu feedback systému, umožní tento hluk v zadní části vozidla potlačit [48,50].

4.3 REÁLNÉ APLIKACE ANC

Metodu aktivního potlačování hluku dnes ve svých prémiových vozech hojně využívá automobilka Genesis, jež se v roce 2015 odpojila od mateřské automobilky Hyundai. Jejich systém RANC (Road active noise control) založený na principech metod ANC popsanych výše, se primárně zaměřuje na nízkofrekvenční hluk (20-500 Hz) způsobený vlivem kontaktu pneumatik s vozovkou. Tento systém využívá jako referenční senzory akcelerometry a rychlostní senzory. V závislosti na rychlosti vozidla vyšlou tyto senzory signál popisující vibrace (vznikající při kontaktu s vozovkou) digitální signálové jednotce (DSP), která jej zanalyzuje a zpracuje. Informace ze signálové jednotky jsou následně vyslány do audiosystému, který začne budit inverzní zvukové vlny. Díky optimalizované rychlosti výpočtu a přenosu signálu je systém schopen tyto operace provést v řádu tisícín sekundy. Výsledný hluk uvnitř automobilu je následně monitorován mikrofony a informace o něm posílány do DSP jednotky za účelem zvýšení míry kvality jeho potlačování. Testováním bylo zjištěno, že RANC systém je schopen snížit hladinu akustického tlaku uvnitř vozu Genesis o 3 dB(A). Obr. 31 popisuje schéma RANC systému ve voze Genesis GV 80 [53].



Obr. 31 Schéma RANC systému ve voze Genesis GV80 [53] - upraveno

5 DODATEČNÉ ODHLUČNĚNÍ VOZIDLA

Aby v dnešní době automobilky splňovaly potřebné emisní limity, je kromě vývoje ekologicky šetrných pohonů potřeba snižovat i co nejvíce hmotnost vozidla. Pro konstrukci automobilu jsou proto čím dál více používány nejen tenčí materiály, ale taktéž jejich menší množství. Úbytek materiálu má však kromě kladného dopadu na snížení emisí, respektive hmotnost vozidla i negativní vliv na kvalitu jeho odhlučnění. Mnoho řidičů proto není s výslednou akustikou uvnitř jejich vozidla spokojeno a vyhledají různé externí firmy, které jsou schopny výslednou akustiku uvnitř vozu zlepšit. Tento fakt potvrzuje i neustále narůstající počet zákazníků ve firmě 2din, kde mi byla mimo jiné poskytnuta možnost konzultace a účast přímo na postupu dodatečného odhlučňování vozu Land Rover Defender 110. Ačkoliv tato kapitola pojednává o odhlučnění poměrně netradičního vozidla, jsou níže popsány postupy obecně platné i pro běžné osobní automobily.



Obr. 32 Odhlučňující materiály Standartplast

Firma 2din využívá k odhlučnění vozů výhradně materiály společnosti Standartplast viz. obr. 32, která se specializuje na výrobu zvukově absorpčních a izolačních materiálů pro dodatečné odhlučnění vozidel. Jak již klasifikace materiálů napovídá, jejich princip a funkčnost je shodná s již dříve popsanými materiály používanými pro odhlučnění vozu při výrobě. Díky tomu, že firma nabízí výběr materiálu v různých cenových kategoriích (Silver Line – Diamond Line), stává se dodatečné odhlučnění dostupnější pro širší a méně náročné spektrum zákazníků. Všechny tyto materiály disponují samolepící vrstvou a jejich aplikace nevyžaduje kromě speciálního válečku (dodáván firmou) použití žádných dalších lepidel či speciálních nástrojů. Zákazník má proto možnost zakoupit si odhlučňující materiály samostatně a provést odhlučnění svého vozu v domácích podmínkách.

5.1 ODHLUČNĚNÍ VOZU LAND ROVER DEFENDER 110

Jak již bylo řečeno, vůz Land Rover Defender 110 viz. obr. 33 se může jevit na první pohled jako poněkud nestandardní vozidlo pro dodatečné odhlučnění. Letos se nicméně jedná již o druhého zákazníka, který si nechal ve firmě 2din stejný typ vozidla odhlučnit. Zatímco většina zákazníků požaduje odhlučnění automobilu především z důvodu akustického klidu při jízdě na dlouhých trasách (dálnicích), je zřejmé, že účel tohoto odhlučnění byl zaměřen především na jízdu v terénu, lese a jiných zátěžových podmínkách. Přáním majitele bylo kromě kompletního odhlučnění vozu provést i výměnu audiosystému.



Obr. 33 Land Rover Defender 110

PRŮBĚH ODHLUČNĚNÍ

Po přistavení a celkovém nafocení vozu bylo provedeno vyčištění a odmaštění vnitřního prostoru, v němž následně proběhla demontáž jednotlivých komponent (sedadla, mříže oken, čalounění dveří a střechy). Následně byla nanесena první, respektive základová vrstva tlumícího (antivibračního) materiálu s názvem STP Black Gold. Tato vrstva, jejímž účelem je co nejvíce zvýšit lokální tuhost karoserie a tím změnit její vlastní frekvence (zabránit vzniku rezonancí), je složena z polymerního adhezivního materiálu, který přiléhá na hliníkovou fólii. Zvýšení tuhosti je po nalepení antivibračního materiálu patrné i po pouhém zaklepání na místa, kde byl materiál aplikován. Vibrace těchto míst (odezva na klepání) jsou v porovnání se stavem před použitím materiálu STP Gold výrazně nižší. Jakmile byla první vrstva materiálu nalepena, byl pro zajištění potřebné přilnavosti (adheze) a eliminace vzduchových kapes použit speciální váleček, kterým se povrch této vrstvy vyhladil. V místech, kde i přesto došlo ke vzniku vzduchových kapes, byl materiál naříznut, aby zbytkový vzduch mohl uniknout ven. Tato vrstva byla nalepena téměř na všechny povrchy uvnitř vozidla (podlaha, stěny, strop, zadní prostor, vnitřní strany dveří, kapota). Následující obrázky uvádí aplikaci antivibračního materiálu STP Gold Black v zadní části vozidla a na kapotu.



Obr. 34 Antivibrační materiál STP Gold Black v zadním prostoru



Obr. 35 Aplikace antivibračního materiálu STP Gold Black na kapotu

Jako druhá vrstva byl použit neopren různé tloušťky nebo porézní absorpční materiál Biplast. Neopren je obecně používán v místech, která jsou vystavena kontaktu s vodou. Proto se například aplikuje v podběžích kol či na podlaze, kde chrání první vrstvu antivibračního materiálu před kontaktem s vodou. Kromě vodní těsnosti má však neopren i termoizolační vlastnosti. Z tohoto důvodu byl použit pro odhlučnění kapoty, kde kromě zvukového útlumu a ochrany proti vodě plní i funkci tepelného štítu.

Pokud se však jedná například o obytný vůz, bývá neopren aplikován v celém obytném prostoru, jelikož kromě odstínění tepla z venku má schopnost udržet teplo i uvnitř vozu, a zajistit tak posádce tepelný komfort.

V našem případě byl neopren využit na přední kapotu (10 mm) a na některé části v kabině či zadní části vozu (3 mm) viz. obr. 36, kvůli zvýšené pravděpodobnosti vzniku vlhkosti uvnitř vozu. Vzhledem k tomu, že spodní část vozu nebyla dostatečně chráněna (absence ochranné gumy, koberce), nebylo možné neopren kvůli případnému poškození aplikovat. Jelikož ale majitel plánuje vůz průběžně vylepšovat a přidávat různá příslušenství, bylo dohodnuto, že v případě nespokojenosti se zvukovým útlumem nebude problém další vrstvy materiálu dolepit.



Obr. 36 Aplikace vrstvy neoprenu

Co se týče střechy v přední části vozidla, byl zde jako druhá vrstva aplikován porézní absorpční materiál Biplast viz. obr 37. V místech, kde by tato vrstva mohla být vystavena působení tlaku, bývá Biplast nahrazen ekvivalentním materiálem Black–Tone. Materiál Black–Tone je navržen tak, aby vlivem působícího tlaku nedošlo ke stlačení jeho pórovité sítě a nebyla tak snížena jeho účinnost absorpce zvukových vln. Další možností je neopren, který se jako náhrada používá především v případě, pokud rozpočet zákazníka nedovolí aplikovat dražší Black–Tone.



Obr. 37 Aplikace porézního materiálu Biplast

Aby bylo ve voze dosaženo co nejlepšího odhlučnění, bývá za normálních podmínek aplikována ještě třetí vrstva materiálu s názvem Noise–Block, která mimo své odhlučňující vlastnosti slouží jako ochrana dvou předešlých vrstev. V tomto případě však vzhledem k rozměrům a provozním podmínkám vozu nebyla tato vrstva materiálu již použita. Ačkoliv byla aplikována převážně pouze základní vrstva materiálu STP Gold Black, na níž byl nalepen neopren či Biplast, celková cena za tyto materiály činila 15 980 Kč. Aplikace dalších vrstev by byla tedy nejen velice nákladná, ale vzhledem k využití a konstrukci vozu by postrádala i smysl. Následující tabulka uvádí jednotlivé ceny za použitý materiál včetně audiotechniky. V uvedených cenách není započtena celková práce čtyř pracovníků, která zabrala dva pracovní dny. Cena včetně audiotechniky činila 29 750 Kč.

Tab.2 Jednotlivé ceny za použitý materiál

Popis položky	Množství	Cena za kus vč. DPH	Cena celkem
STP Black Gold	86 ks	99,17 Kč	10 320 Kč
STP Biplast 10 mm	18 ks	148,46 Kč	3 240 Kč
Neopren 3 mm	7 ks	148,76 Kč	1 260 Kč
Neopren 10 mm	4 ks	239,67 Kč	1 160 Kč
Audiotechnika	-	-	13 770 Kč

ZÁVĚR

Vzhledem k přetrvávající klimatické krizi je cílem lidstva co nejvíce snižovat emise vypouštěné do ovzduší. Jelikož téměř 30 % všech emisí oxidu uhličitého v dnešní době vzniká v dopravě [54], mají emisní limity zavedené Evropskou unií výrazný dopad na automobilový průmysl. Automobilky jsou proto nuceny zvyšovat jak účinnost spalovacích motorů, tak vyvíjet elektrické a alternativní pohony. Používání těchto pohonů zaručuje nejen snižování škodlivých emisí, ale zajišťuje taktéž útlum hluku vyzařovaného pohonnou jednotkou a výfukovým a sacím systémem, které nyní patří mezi významné zdroje hluku. V novodobých automobilech s moderními pohony je proto třeba věnovat pozornost především hluku pneumatik a aerodynamickému hluku.

Snahy automobilek snižovat emise CO₂ však spočívají nejen ve zvyšování účinnosti spalovacích motorů, nebo v přechodu na alternativní pohony, ale taktéž ve vylehčování konstrukcí karoserie automobilu. Odlehčené, a ne zcela dobře z hlukového a vibračního hlediska vyvinuté konstrukce karoserie, však často postrádají zvukoizolační schopnosti a způsobují prudké navyšování vyzařovaného akustického výkonu nejen vně, ale i uvnitř vozidla. Ve vozech nižších a středních tříd je snaha tento problém řešit pomocí zvukově absorpčních materiálů či formou nástřiku speciálních povlaků v místech, které jsou nejvíce náchylné na přenos vibrací a vyzařování hluku. Tyto metody však zdaleka nenahradí absenci tlustších kovů používaných pro výrobu karoserie automobilu.

Zajištění klidného akustického prostředí v interiéru vozidla ale nezávisí pouze na výrobci automobilu. Pokud automobil není pravidelně servisován, může docházet k mnoha degradacím, které se projeví ve formě nežádoucího hluku a vibrací. Mezi tyto degradace se může řadit například opotřebení komponent hnacího traktu, vznik mechanických vůlí či opotřebení ložisek.

Ze struktury automobilů navštěvujících společnost 2din, která se specializuje na odhlučnění vozidel vyplývá, že pokud cena vozu nepřesahuje hodnotu přibližně 1,5 milionu korun, nedá se očekávat, že jeho odhlučnění bude na kvalitní úrovni. Stále více motoristů se proto uchyluje k možnosti dodatečného odhlučnění vozidla u podobných externích firem. Podle orientačního měření hlukoměrem Testo 815 prováděného firmou 2din, se hodnota rozdílu akustického tlaku před odhlučněním a po odhlučnění pohybuje přibližně okolo 3 dB(A). Ačkoliv se může tato hodnota zdát jako nepatrný rozdíl, spokojenost zákazníku hovoří o opaku.

Snaha snižovat co nejvíce produkované emise pravděpodobně nepomine, návrat automobilek k používání hutnějších a objemnějších materiálů se tedy jeví jako velice nepravděpodobný. Díky neustávajícímu technologickému pokroku lze spíše očekávat, že metody snižování hluku budou zaměřeny především na způsoby jeho aktivního potlačování. Mimo jiné lze usoudit, že jeho podstatná část bude eliminována i díky postupnému nahrazování konvenčních spalovacích motorů alternativními či čistě elektrickými pohony. Patrně tedy bude v budoucnu možné narazit na vozy disponující tak tichým akustickým prostředím, ve kterém řidič nerozpozná rozdíl mezi jízdou při vysokých a nízkých rychlostech.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] NAŘÍZENÍ EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY (EU) č. 540/2014 ze dne 16. dubna 2014 o hladině akustického tlaku motorových vozidel a náhradních systémů tlumení hluku a o změně směrnice 2007/46/ES a o zrušení směrnice 70/157/EHS: Text s významem pro EHP. In: . 2014, ročník 2014, číslo 540. Dostupné také z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?uri=celex%3A32014R0540>
- [2] Sada asistentů jízdy v pružích. *Mercedes-Benz* [online]. c2021 [cit. 2021-5-17]. Dostupné z: <https://www.mercedes-benz.cz/passengercars/mercedes-benz-cars/models/glc/suv-x253/safety/safetypackages/lanepackage.html>
- [3] VANDASOVÁ, Zdeňka. Co je to hluk a jak se měří. *Státní zdravotní ústav* [online]. 2020, 23. září 2020 [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: <http://www.szu.cz/tema/zivotni-prostredi/co-je-to-hluk-a-jak-se-meri>
- [4] NOVÝ, Richard. *Hluk a chvění*. Vyd. 3. Praha: Česká technika – nakladatelství ČVUT, 2009. ISBN 978-80-01-04847-9.
- [5] NAVRÁTIL, Leoš a Jozef ROSINA. *Medicínská biofyzika*. 2., zcela přepracované a doplněné vydání. Praha: Grada, 2019. ISBN 978-80-271-0209-9.
- [6] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. *Fyzika I*. 2. vyd. Vysoké učení technické v Brně: VUTUM, 2013. ISBN 978-80-214-4123-1.
- [7] SCHAUER, Pavel. *Vybrané statě z akustiky* [online]. Ústav fyziky Stavební fakulty VUT v Brně, 2008 [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: http://fyzika.fce.vutbr.cz/doc/vyuka_schauer/vybrane_state_z_akustiky.pdf
- [8] KAŇKA, Jan. *Akustika stavebních objektů*. Brno: Era, 2009. ISBN 978-80-7366-140-3.
- [9] MARTYR, A.J. a M.A. PLINT. *Engine Testing* [online]. 4th.ed. Butterworth-Heinemann, 2012. ISBN 9780080969497. Dostupné také z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080969497000091>
- [10] ZELLMAN, Malinda. The Difference Between dBA and dBC. *Bizfluent* [online]. 2017, 26 September 2017 [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: <https://bizfluent.com/info-8665541-differences-dba-dbc.html>
- [11] NOVÁČEK, Jiří. Akustika staveb: Stavební akustika - Základy a terminologie. *TZB-info* [online]. Stavební fakulta, ČVUT v Praze, c2001-2021 [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/akustika-staveb/177-stavebni-akustika-zaklady-a-terminologie>
- [12] HARRISON, Matthew. *Vehicle Refinement: Controlling Noise and Vibration in Road Vehicles* [online]. Great Britain: Butterworth-Heinemann, 2004. ISBN 9780080474755. Dostupné také z: <https://www.elsevier.com/books/vehicle-refinement/harrison/978-0-506-6129-4>

- [13] MORELLO, Lorenzo, Lorenzo Rosti ROSSINI, Giuseppe PIA a Andrea TONOLI. *The Automotive Body: Volume II: System Design* [online]. Springer, 2011. ISBN 978-94-007-0516-6. Dostupné také z: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-94-007-0516-6#about>
- [14] PANG, Jiang. *Noise and Vibration Control in Automotive Bodies* [online]. Hoboken (New Jersey): Wiley, 2018. ISBN 9781119515517. Dostupné také z: <https://lccn.loc.gov/2018023710>
- [15] JANDÁK, Zdeněk. Vibrace přenášené na člověka. *Státní zdravotní ústav* [online]. 2007, 13. listopadu 2007 [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: <http://www.szu.cz/tema/pracovni-prostredi/vibrace-prenasene-na-cloveka>
- [16] WANG, Xu. *Vehicle noise and vibration refinement* [online]. Boca Raton (Florida): Woodhead Publishing, 2010, 448 s. ISBN 978-1-84569-804-1. Dostupné také z: <https://www.elsevier.com/books/vehicle-noise-and-vibration-refinement/wang/978-1-84569-497-5>
- [17] BORO VAN, Petr. O měření modálních i provozních tvarů kmitu. *Technický týdeník* [online]. 2016, 1. listopadu 2016 [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/ze-zivota-vyzkumneho-centra/o-mereni-modalnich-i-provoznich-tvaru-kmitu_37760.html
- [18] NOVOTNÝ, Pavel. *Přednáška k předmětu Vibrace a hluk vozidel: Zdroje vibrací a hluku ve vozidlech* [online]. Brno, 2017.
- [19] JEDELSKÝ, Jan. *Vyhodnocování dílčích zdrojů hluku a vibrací spalovacího motoru* [online]. Brno, 2001. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/vutium/spisy?action=detail&id=468&str=1>. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav dopravní techniky.
- [20] RASCH, F. *Lokalizace hlavních zdrojů hluku spalovacího motoru s využitím akustické emise*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 76 s. Vedoucí dizertační práce prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.
- [21] CROLLA, David A. *Automotive Engineering: Powertrain, Chassis System and Vehicle Body* [online]. Butterworth-Heinemann, 2009, 834 s. ISBN 978-1-85617-577-7. Dostupné také z: <https://www.elsevier.com/books/automotive-engineering/crolla/978-1-85617-577-7>
- [22] BERO UN, Stanislav. *Studijní texty k předmětu „Motorová vozidla“: Vozidlové motory* [online]. Technická univerzita v Liberci, fakulta strojní, katedra strojů průmyslové dopravy. Dostupné z: <http://old.kvm.tul.cz/studenti/skripta.htm>
- [23] CHUCHMA, O. *Návrh a optimalizace sacího a výfukového potrubí zážehového motoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 83 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Beran.
- [24] BARTON, David C. a John D. FIELDHOUSE. *Automotive Chassis Engineering* [online]. Cham, Switzerland: Springer, 2018. ISBN 978-3-319-72437-9. Dostupné také z: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-72437-9>
- [25] SHIGLEY, Joseph E., Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS. *Konstruování strojních součástí*. Brno: VUTIU M, 2010. ISBN 978-80-214-2629-0.

- [26] HARTL, Martin. *Přednáška k předmětu Konstruování strojů: Čelní ozubená soukolí se šikmými zuby* [online]. Brno, 2021.
- [27] MCBRIDE, Sterling, Lucas SPIES a Ricardo BURDISSO. *TIRE-PAVEMENT INTERACION NOISE: EXPERIMENTS AND MODEL DEVELOPMENT* [online]. Blacksburg, Virginia 24060, 2018. Dostupné z: http://www.sea-acustica.es/fileadmin/Cadiz18/AAM-0_011.pdf
- [28] SoundComfort Technology. *Goodyear* [online]. [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: https://www.goodyear.eu/cs_cz/consumer/why-goodyear/soundcomfort-technology.html
- [29] KAŠPAR, Jiří. Technologická pravidla č. 160: VIAPHONE. *Eurovia* [online]. Praha, 2011, září 2011 [cit. 2021-2-12]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/22414136-Technologicka-pravidla-viaphone-c-160-zari-2011-spolecnosti-skupiny-eurovia-cs.html>
- [30] VLK, František. *Dynamika motorových vozidel*. 2. Brno: František Vlk, 2003. ISBN 80-239-0024-2.
- [31] ŠÁLENÝ, V. Numerická simulace hluku generovaného nestabilitami ve smykové vrstvě. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 104 s. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
- [32] HUCHO, W.H. *Aerodynamics of Road Vehicles*. 4th Edition. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 1998. ISBN 0-7680-0029-7.
- [33] ACOUSTIC GLASS-akustické sklo. *Saint-Gobain* [online]. c2015 - 2019 [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: <https://www.saint-gobain-sekurit.cz/cs/portfolio/item/9-dbcontrol>
- [34] JEŽEK, David. Noctua finišuje práce na aktivním potlačení hluku ventilátorů. *Diit* [online]. 2013, 18.6.2013 [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: <https://diit.cz/clanek/noctua-finisuje-prace-na-aktivnim-potlaceni-hluku-ventilatoru>
- [35] ZECHNER, Christoph, Georg SEELIG, Marc RULLAN a Mustafa KHAMMASH. Molecular circuits for dynamic noise filtering. *Proceedings of the National Academy of Sciences* [online]. National Academy of Sciences, 2016, **113**(17). ISSN 0027-8424. Dostupné z: doi:10.1073/pnas.1517109113
- [36] NOUZAWA, Takahide, Ye LI, Naohiko KASAKI a Takahi NAKAMURA. Mechanism of Aerodynamic Noise Generated from Front-Pillar and Door Mirror of Automobile. *Journal of Environment and Engineering* [online]. 2011, **6**(3). Dostupné z: doi:DOI: 10.1299/jee.6.615
- [37] Automotive Structural Adhesives - OEM & Tier. *3M Science. Applied to Life* [online]. c2021 [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: https://www.3m.com/3M/en_US/oem-tier-us/products/automotive-structural-adhesives/
- [38] KIM, Hyun-guk, Can NERSE a Semyung WANG. Topography optimization of an enclosure panel for low-frequency noise and vibration reduction using the equivalent radiated power approach. *Materials & design* [online]. Republic of Korea, 2019, 15 August 2019, **183**. ISSN 0264-1275. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2019.108125

- [39] WARNOCK, A.C.C. Factors affecting sound transmission loss. *Canadian Building Digest* [online]. 1985, (239). ISSN 0008-3097. Dostupné z: doi:10.4224/20328703
- [40] ELBASSEER, Mohammed Abd, M.A. KENAWY a M.Y. ELAIDY. Theoretical determination of critical frequency f_c of some acoustic material panels. In: *12th International Congress on Sound and Vibration* [online]. Lisbon, 2005. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/290008801_Theoretical_determination_of_critical_frequency_fc_of_some_acoustic_material_panels
- [41] M 1761. *Steinbach AG* [online]. [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: <https://www.steinbach-ag.de/en/thermal-and-acoustic-insulation/products/product-group/glass-fibre-and-silica-materials/m-1761.html>
- [42] Products & Technologies: Interior. *Autoneum: Mastering Sound and Heat* [online]. c2021 [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: <https://www.autoneum.com/products-technologies/interior/>
- [43] HRADIL, Miroslav. Inovace a technologie: MODERNÍ SEDADLA: CO JE SKRYTO POD POTAHEM. *Škoda Storyboard* [online]. 2020, 12. 11. 2020 [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: <https://www.skoda-storyboard.com/cs/inovace-a-technologie/moderni-sedadla-co-je-skryto-pod-potahem/>
- [44] Dashboard Removal. *Mechanical Malarkey* [online]. 7.9.2017 [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: <https://mechanicalmalarkey.com/2017/09/07/dashboard-removal-2/>
- [45] The Diffrent Types of Windscreens: What is Laminated Windscreen Glass? *The Wind Screen Company Group* [online]. c2021 [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: <https://www.thewindscreen.co.uk/help-advice/different-types-windscreens/>
- [46] SAJIL, C. K, C. L BIJI a Achuthsankar S NAIR. Effect of Transducer Positioning in Active Noise Control. In: *2018 5th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN)* [online]. Noida, India: IEEE, 2018, s. 33-38. ISBN 978-1-5386-3045-7. Dostupné z: doi:10.1109/SPIN.2018.8474254
- [47] Active noise control. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 27 February 2021 [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Active_noise_control
- [48] JIA, Zibin, Xu ZHENG, Quan ZHOU, Zhiyong HAO a Yi QIU. A Hybrid Active Noise Control System for the Attenuation of Road Noise Inside a Vehicle Cabin. *Sensors* [online]. Basel: MDPI, 2020, 15 December 2020, **20**(24). ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi: 10.3390/s20247190
- [49] Active Sound Management In Cars: Portfolio-posts. *Creo Dynamics* [online]. c2018 [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: <https://creodynamics.com/portfolio-posts/active-sound-management-cars/>
- [50] SAMARASINGHE, Prasanga N, Wen ZHANG a Thushara D ABHAYAPALA. Recent Advances in Active Noise Control Inside Automobile Cabins: Toward quieter cars. *IEEE Signal Processing Magazine* [online]. IEEE, 2016, **33**(6), 61-73. ISSN 1053-5888. Dostupné z: doi:10.1109/MSP.2016.2601942

- [51] BULVA, O. *Aktivní potlačení hluku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav biomedicínského inženýrství, 2013. 68 s., 15 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Jaroslav Balogh.
- [52] KRÜGER, Hauke, Peter VARY, Thomas SCHUMACHER a Christophe BEAUGEANT. *Investigation and development of digital active noise control headsets* [online]. In: . Tel Aviv, Israel: Proceedings of International Workshop on Acoustic Echo and Noise Control (IWAENC), 2010. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/228734196_Investigation_and_development_of_digital_active_noise_control_headsets/citations#fullTextFileContent
- [53] NVH: Road Noise Reduced Through Soundwaves. *Hyundaimotorgroup* [online]. [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: <https://tech.hyundaimotorgroup.com/essential-performance/nvh/>
- [54] Emise CO₂ z aut: fakta a čísla (infografika). *Evropský parlament* [online]. 2019, 25.3.2019, 18.4.2019 [cit. 2021- 5- 9]. Dostupné z: <https://www.europarl.europa.eu/news/cs/headlines/society/20190313STO31218/emise-co2-z-aut-fakta-a-cisla-infografika>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

AB		Airborne sound
ANC		Active noise control
DSP		Digitální signálový procesor
EU		Evropská unie
EVA		Ethylenvinylacetát
PET		Polyethylentereftalát
PUR		Polyuretan
PVB		Polyvinylbutyral
SB		Structure-borne sound
STP		Standartplast
RANC		Road active noise control
A	[Hz-mm]	Materiálová konstanta
α	[-]	Koeficient absorpce
d	[mm]	Průměr
f	[Hz]	Frekvence
f_c	[Hz]	Kritická frekvence
f_1	[Hz]	Vlastní frekvence desky
f_n	[Hz]	Otáčková frekvence
f_z	[Hz]	Zubová frekvence
F	[N]	Síla budící vibrace
G	[Pa]	Modul pružnosti ve smyku
H^{AB}	[-]	Přenosová funkce pro zvuk šířený vzduchem
H^{SB}	[-]	Přenosová funkce pro zvuk šířený strukturou materiálu
I	[W.m ⁻²]	Intenzita zvuku
I_0	[W.m ⁻²]	Referenční hladina akustického výkonu
k	[m ⁻¹]	Úhlový vlnčet
K	[Pa]	Modul objemové pružnosti
L_i	[dB]	Hladina intenzity zvuku
L_{pA}	[dB]	Hladina akustického tlaku podle váhového filtru A
L_w	[dB]	Hladina akustického výkonu
N	[W]	Měrný akustický výkon
p_0	[Pa]	Referenční hodnota akustického tlaku

p	[Pa]	Akustický tlak
p_m	[Pa]	Amplituda akustického tlaku
P	[Pa]	Akustický tlak udávající odezvu interiéru
P_E	[Pa]	Zdroj emitující zvukové vlny
R	[dB]	Činitel neprůzvučnosti
s	[m]	Akustická výchylka
s_m	[m]	Amplituda akustické výchylky
S	[m ²]	Plocha
t	[s]	Čas
T	[s]	Perioda
v_k	[m.s ⁻¹]	Rychlost zvuku v kapalném a plynném prostředí
v_p	[m.s ⁻¹]	Rychlost zvuku v pevných látkách
W_0	[W]	Referenční hladina akustického výkonu
W_a	[W]	Akustický výkon přeměněný v tepelnou energii
W_i	[W]	Akustický výkon dopadající vlny
W_t	[W]	Akustický výkon přenesené vlny
W	[W]	Akustický výkon
z	[-]	Počet zubů kola
η	[-]	Ztrátový součinitel
ρ	[kg.m ⁻³]	Hustota prostředí
ω	[rad.s ⁻¹]	Úhlová rychlost
W	[W]	Akustický výkon
W_0	[W]	Referenční hladina akustického výkonu
W_a	[W]	Akustický výkon přeměněný v tepelnou energii
W_i	[W]	Akustický výkon dopadající vlny
W_t	[W]	Akustický výkon přenesené vlny
z	[-]	Počet zubů kola
η	[-]	Ztrátový součinitel
ρ	[kg.m ⁻³]	Hustota prostředí
ω	[rad.s ⁻¹]	Úhlová rychlost